

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»**

**Факультет автоматизації, промислової інженерії та екології
Кафедра екології та технології рослинних полімерів**

«На правах рукопису»

УДК 678.067.5:66.092.4

До захисту допущено:

Завідувач кафедри

Віта ГАЛИШ

«__»_____ 2025 р.

Магістерська дисертація

на здобуття ступеня магістра

зі спеціальності 101 «Екологія»

на тему: «Каталітичний піроліз відходів полімерних матеріалів»

Виконала:

студентка II курсу, групи ЛЕ-41мп

Войтенко Кароліна - _____

Науковий керівник:

в.о. декана ФАПЕ, доктор технічних наук, професор

Іваненко Олена Іванівна _____

Консультант з розділу стартап-проєкту:

кандидат економічних наук, доцент, доцент кафедри
промислового маркетингу,

Юдіна Наталія Володимирівна _____

Рецензент:

кандидат хімічних наук, старший науковий співробітник

Інституту фізичної хімії ім. Л.В. Писаржевського

Трипольський Андрій Іккійович _____

Засвідчую, що у цій магістерській
дисертації немає запозичень з праць
інших авторів без відповідних посилань.
Студент _____

Київ – 2025 року

**Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут
імені Ігоря Сікорського»**

Інститут/факультет Факультет автоматизації, промислової інженерії та екології
(повна назва)

Кафедра Екології та технології рослинних полімерів
(повна назва)

Рівень вищої освіти – другий (магістерський) за освітньо-професійною
програмою «Екологічна безпека»

Спеціальність 101 Екологія
(код і назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри

(підпис) (Ім'я, ПРІЗВИЩЕ)
«__» _____ 2025 р.

**ЗАВДАННЯ
на магістерську дисертацію студенту**

Войтенко Кароліні -

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема дисертації: «Каталітичний піроліз відходів полімерних матеріалів», науковий керівник дисертації Іваненко Олена Іванівна, в.о. декана ФАПЕ, доктор технічних наук, професор, затверджені наказом по університету від «3» листопада 2025 р. №4744-с.

2. Строк подання дисертації студенткою 15 грудня 2025 р

3. Об'єкт дослідження – процес піролізу поліетилену високої щільності.

4. Вихідні дані: Для дослідження використовуються відходи поліетилену високої щільності, попередньо подрібнені та охарактеризовані за вмістом летких речовин, зольністю та елементним складом.

5. Перелік завдань, які потрібно розробити: 1) провести аналіз науково-технічної інформації щодо сучасних методів термічного та каталітичного розкладу полімерних відходів; 2) дослідити умови проведення каталітичного піролізу поліетилену високої щільності: температура, тип каталізатора, швидкість нагріву та час витримки; 3) провести експериментальне визначення матеріальних балансів процесу при роботі з різними каталізаторами: визначити вихід рідких, газових та твердих продуктів, їх енергетичні та фізико-хімічні показники; 4) Вивчити вплив різних каталізаторів на стабільність та селективність реакцій; 5) Оцінити економічну ефективність та комерційний потенціал технології, включаючи можливість впровадження стартап-проєкту.

6. Перелік графічного (ілюстративного) матеріалу: 21

7. Орієнтовний перелік публікацій:

1. Войтенко К., Іваненко О., Корнієнко Б., Бичко І., Мартинюк А. Каталітичний швидкий піроліз відходів полімерних матеріалів // Матеріали XXV Міжнародної науково-практичної

конференції «Екологія. Людина. Суспільство» пам'яті д-ра Дмитра СТЕФАНИШИНА (12 червня 2025 р., м. Київ, Україна). - Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2025. – с. 175-180

2. Войтенко К., Іваненко О.І., Карвацький А.Я., Коріненко Б.В., Бичко І.Б., Мартинюк А.С., Тетерятников Г.В. Каталітичний швидкий піроліз відходів поліетилену високої щільності. // Екологія та Ресурсозбереження. Bulletin of National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute» Series «Chemical Engineering, Ecology and Resource Saving». 2025. No 3 (24) с. 61-69.

8. Консультанти розділів дисертації

Розділ	ПІБ та посада консультанта	Підпис, дата	
		Завдання видав	Завдання прийняв
Розробка стартап-проєкту	Юдіна Н.В., кандидат економічних наук, доцент, доцент кафедри промислового маркетингу		

9. Дата видачі завдання

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання магістерської дисертації	Строк виконання етапів магістерської дисертації	Примітка
1	Отримання завдання магістерської дисертації. Проходження переддипломної практики.	01.09.25 - 26.10.25	Виконано
2	Збір, аналіз та оформлення науково-технічної літератури за темою роботи.	27.10.25 - 7.11.25	Виконано
3	Вибір методик та методів проведення досліджень	8.11.25 - 10.11.25	Виконано
4	Дослідження процесів коагулювання та фільтрування води. Визначення оптимальних умов.	11.11.25 - 16.11.25	Виконано
5	Дослідження ефективності очищення води з використанням каталітичних завантажень на основі вугілля та аніоніту оброблених перманганатом калію.	17.11.25 - 22.11.25	Виконано
6	Розробка стартап-проєкту	03.11.25 - 20.11.25	Виконано
7	Оформлення магістерської дисертації	03.12.25 - 10.12.25	Виконано
8	Представлення роботи до захисту	15.12.25 - 25.12.25	Виконано

Студент

Науковий керівник дисертації

(підпис)

(підпис)

Кароліна Войтенко

(Ім'я, ПРІЗВИЩЕ)

Олена Іваненко

(Ім'я, ПРІЗВИЩЕ)

РЕФЕРАТ

Магістерська дисертація містить: 101 с., 33 табл., 21 рисуноків, 52 джерел літератури.

Актуальність теми дослідження: Поліетилен високої щільності (ПЕВЩ) є одним із найбільш стійких до розкладу полімерів, і його деградація в природних умовах може тривати від 100 до 500 років, що утворює накопичення величезних обсягів відходів у навколишньому середовищі. В Україні не більше 15% всього утвореного пластику перероблюється. Традиційним методом поводження з ПЕВЩ є його передача на звалища. Значний обсяг пластикових відходів потрапляє у водні екосистеми, де в процесі фрагментації перетворюється на мікропластик, що акумулюється в трофічних ланцюгах та становить потенційну загрозу для функціонування екосистем і здоров'я населення. Каталітичний піроліз виступає перспективною технологією, що дозволяє перетворювати ПЕВЩ на рідкі та газоподібні вуглеводні з мінімальним впливом на довкілля.

Мета роботи: дослідити вплив умов термічного піролізу на вихід та склад вуглеводневих продуктів з HDPE.

Для досягнення зазначеної мети було поставлено та вирішено такі **завдання:**

- проаналізувати існуючі технології переробки полімерних матеріалів, зокрема механічні та хімічні методи, та оцінити їх обмеження щодо ПЕВЩ.
- дослідити особливості термічного та каталітичного піролізу ПЕВЩ, включаючи температурні режими, швидкість нагрівання та механізм розкладу полімерного ланцюга.
- оцінити вплив різних каталізаторів (НУ, Fe_3O_4 , Fe_2O_3 , Ni/MgO , Ni/CaO , Аскарит) на вихід рідких, газових та твердих продуктів піролізу та їх фізико-хімічні властивості.
- провести експериментальний аналіз піролізу ПЕВЩ із використанням лабораторної установки, побудувати матеріальні баланси та оцінити стабільність процесу при різних умовах.

– надати оцінку можливостям застосування каталітичного піролізу як ефективної технології переробки пластикових відходів з точки зору екологічного впливу та отримання цінних вторинних продуктів.

Об’єкт дослідження: процес піролізу поліетилену високої щільності.

Предмет дослідження: термічні умови, механізм розкладу HDPE та характеристики отриманих продуктів.

Методи дослідження: експериментальний аналіз піролізу HDPE з використанням термогравіметричного аналізу та газохроматографії, аналіз наукових джерел.

Практичне значення отриманих результатів: результати можуть бути використані для вдосконалення технологій переробки пластикових відходів.

Апробація результатів магістерської дисертації: результати дисертаційної роботи були представлені на науково-практичних міжнародних та всеукраїнських конференціях: «Екологія. Людина. Суспільство», Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2025; «Екологія та Ресурсозбереження», Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2025.

Ключові слова: ПОЛІЕТИЛЕН ВИСОКОЇ ЩІЛЬНОСТІ, ПІРОЛІЗ, КАТАЛІЗАТОРИ, ПІРОЛІЗНА РІДИНА, ПІРОКАРБОН

ABSTRACT

Master's thesis contains: 101 p., 33 tables, 21 diagrams, 52 literature sources.

Relevance of the research topic: High-density polyethylene (HDPE) is one of the most resistant polymers to decomposition, and its degradation under natural conditions can last from 100 to 500 years, which forms the accumulation of huge amounts of waste in the environment. In Ukraine, no more than 15% of all generated plastic is recycled. The traditional method of handling HDPE is its transfer to landfills. A significant amount of plastic waste enters aquatic ecosystems, where it is transformed into microplastics during the fragmentation process, which accumulate in food chains and pose a potential threat to the functioning of ecosystems and human health. Catalytic pyrolysis is a promising technology that allows converting HDPE into liquid and gaseous hydrocarbons with minimal impact on the environment.

Purpose of the work: to investigate the influence of thermal pyrolysis conditions on the yield and composition of hydrocarbon products from HDPE.

To achieve this goal, the following tasks were set and solved:

- to analyze existing technologies for processing polymeric materials, in particular, mechanical and chemical methods, and to assess their limitations for HDPE.
- to investigate the features of thermal and catalytic pyrolysis of HDPE, including temperature regimes, heating rate and the mechanism of polymer chain decomposition.
- to assess the effect of various catalysts (NH_3 , Fe_3O_4 , Fe_2O_3 , Ni/MgO , Ni/CaO , Ascarite) on the yield of liquid, gaseous and solid pyrolysis products and their physicochemical properties.
- to conduct an experimental analysis of HDPE pyrolysis using a laboratory setup, build material balances and assess the stability of the process under different conditions.

– to assess the possibilities of using catalytic pyrolysis as an effective technology for processing plastic waste from the point of view of environmental impact and obtaining valuable secondary products.

Object of research: high-density polyethylene pyrolysis process.

Subject of research: thermal conditions, HDPE decomposition mechanism and characteristics of the obtained products.

Research methods: experimental analysis of HDPE pyrolysis using thermogravimetric analysis and gas chromatography, analysis of scientific sources.

Practical significance of the obtained results: the results can be used to improve plastic waste processing technologies.

Approbation of the results of the master's thesis: the results of the dissertation were presented at scientific and practical international and all-Ukrainian conferences: "Ecology. Man. Society", Kyiv: Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute, 2025; "Ecology and Resource Conservation", Kyiv: Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute, 2025.

Keywords: HIGH-DENSITY POLYETHYLENE, PYROLYSIS, CATALYST, PYROLYSIS LIQUID, PYROCARBON

ЗМІСТ

ВСТУП	9
РОЗДІЛ 1	
ЗАГАЛЬНІ ВІДОМОСТІ ПРО ПЕВЩ	12
1.1. Структура поліетилену високої щільності	12
1.2. Хімічні властивості ПЕВЩ	13
1.3. Проблема накопичення поліетилену високої щільності та його вплив на навколишнє середовище та здоров'я людей	16
1.4. Висновок до Розділу 1	16
РОЗДІЛ 2	
МЕТОДИ ТА ОБ'ЄКТИ ДОСЛІДЖЕНЬ	20
2.1. Звичайний піроліз	21
2.2. Швидкий піроліз	22
2.3. Піролізна установка	24
2.4. Підготовка каталізаторів	24
2.5. Хроматографічний аналіз	25
2.6. Висновок до Розділу 2	25
РОЗДІЛ 3	
ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА ЧАСТИНА ТА АНАЛІЗ ОТРИМАНИХ РЕЗУЛЬТАТІВ	27
3.1 Результати процесу звичайного піролізу	27
3.2 Результати процесу швидкого піролізу	37
3.3 Висновок до Розділу 3	43
РОЗДІЛ 4	
РОЗРОБКА СТАРТАП-ПРОЄКТУ	44
4.1 Опис ідеї проекту	44
4.2 Технологічний аудит ідеї проекту	47
4.3 Аналіз ринкових можливостей запуску стартап-проекту	48
4.4 Розроблення ринкової стратегії проекту	60
4.5 Розроблення маркетингової програми стартап-проекту	63
4.6 Висновок до Розділу 4	69
ВИСНОВКИ	75
ЛІТЕРАТУРА	77
ДОДАТОК А	84

ВСТУП

ПЕВІЩ є хімічно інертним матеріалом, що забезпечує його тривалий термін експлуатації, але водночас створює серйозну проблему, коли мова йде про його переробку. Він майже не піддається біологічному розкладу. У природних умовах його деградація може тривати від 100 до 500 років, залежно від умов середовища - температури, вологості, впливу ультрафіолету. Це означає, що більшість виробів з ПЕВІЩ, які були вироблені десятки років тому, все ще перебувають на сміттєзвалищах або в океані.

Дослідження каталітичного піролізу поліетилену високого тиску в порівнянні з традиційним термічним піролізом є важливим кроком у розробці ефективних технологій переробки пластикових відходів. У цій статті розглядаються особливості процесу каталітичного піролізу ПЕВІЩ, його переваги та вплив на склад продуктів у порівнянні з некаталітичним піролізом.

У контексті сучасного розвитку технологій переробки полімерних відходів загальною науковою проблемою є ефективне перероблення і подальше поводження поліетилену високої щільності з отриманням цінних продуктів із мінімальним негативним впливом на довкілля. Каталітичний піроліз, як один із перспективних методів термічної переробки, активно досліджується в науковій спільноті, особливо щодо підбору ефективних каталізаторів, температурних режимів і типів отримуваних продуктів.

Якщо брати до уваги дослідження стосовно обраної теми, то існуючі технології переробки: механічна та хімічна, мають значні обмеження. Механічна переробка, при якій пластик подрібнюється та переплавляється, часто призводить до зниження якості матеріалу. Хімічна переробка, яка включає розкладання пластика на його складові частини, потенційно може забезпечити більшу ефективність, але вона залишається дорогою і технічно складною.

Інші проведені дослідження прийшли до таких заключень:

Трансформація ПЕВЩ у цінні довголанцюгові дикарбонові кислоти відбувалась через часткове створення ненасичених подвійних зв'язків у полімерному ланцюзі за допомогою двохетапного методу – дегідрування та окиснення ПЕВЩ; Каталізований піроліз значно збільшує вихід рідких вуглеводнів у порівнянні з некаталітичним піролізом, забезпечуючи до 75-85% рідких продуктів, які здебільшого складаються з бензинових і дизельних фракцій; Найвищий вихід піролізної олії (61,05 % мас.) було досягнуто при швидкості нагрівання 2 °C/хв та тривалості реакції 75 хвилин. Отримана піролізна олія мала вищу теплоту згоряння, знаходиться в межах 44–45 МДж/кг, що відповідає показникам традиційного дизельного палива;

Незважаючи на значні успіхи інших дослідників, невирішеною частиною наукової проблеми є забезпечення стабільної якості піролізного продукту, уніфікація параметрів процесу для різних типів ПЕВЩ-відходів, зниження енергоспоживання процесу при збереженні високого виходу цільових продуктів. Також недостатньо вивчено вплив фізико-хімічних властивостей відходів ПЕВЩ, наприклад, наявність домішок, ступінь забруднення на ефективність каталітичного розкладу.

РОЗДІЛ 1

ЗАГАЛЬНІ ВІДОМОСТІ ПРО ПЕВЩ

1.1. Структура поліетилену високої щільності

ПЕВЩ або поліетилен високої щільності, також відомий як HDPE (англ. High-Density Polyethylene) - є термопластичним полімером, який формується з мономера етилену (C_2H_4) через процес полімеризації при низькому тиску. Цей поліетилен вирізняється більш компактною і лінійною структурою молекул порівняно з поліетиленом низької щільності (LDPE), що надає йому унікальні фізико-механічні властивості.

Основною будівельною одиницею ПЕВЩ є мономер етилену (C_2H_4), який полімеризується у довгі ланцюги з повторюваних ланок $—CH_2—$. Він має лінійний полімерний ланцюг, в якому атоми вуглецю зв'язані з атомами водню. Ця лінійність дозволяє полімерним ланцюгам щільно упаковуватися одна відносно одної, що значно підвищує кристалічність матеріалу. Кристалічність ПЕВЩ може досягати 60-80%, що робить його більш твердим і механічно міцним порівняно з поліетиленом низької щільності (LDPE), у якого більша кількість розгалужень зменшує здатність ланцюгів щільно упаковуватися.

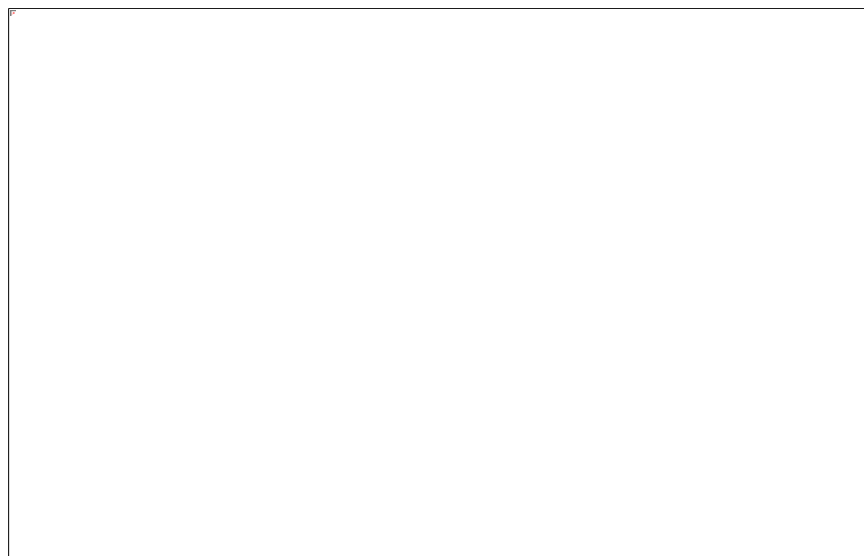


Рис. 1.1 - Структура поліетилену високої щільності.

1.2. Хімічні властивості ПЕВЩ

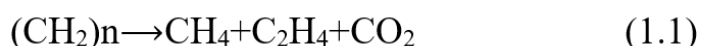
ПЕВЩ демонструє високу стійкість до багатьох агресивних хімічних речовин. Він не вступає в реакцію з більшістю кислот і лугів при кімнатній температурі, що дозволяє його використовувати в умовах агресивних середовищ, резервуарів для хімічних речовин або контейнерів для зберігання промислових рідин.

Є стійким до багатьох органічних розчинників при кімнатній температурі: бензину, жирів, спиртів і кетонів. При підвищеній температурі може відбуватися певне розм'якшення або набухання поліетилену під впливом, наприклад, ароматичних вуглеводнів.

Також має відносно низьку реакційну здатність до окиснювачів, але при тривалому впливі ультрафіолетового випромінювання або високих температур полімер може зазнавати окислення, що призводить до втрати механічних властивостей і розпаду структури. Для захисту від окислення можуть додаватися антиоксиданти та інші стабілізатори, що значно подовжує термін його служби.

ПВЕЩ практично не поглинає вологу, що робить його ідеальним для застосування у вологих умовах або в контакті з водою, його водопоглинання становить менше ніж 0.01%. ПЕВЩ не піддається гідролізу і зберігає свої властивості навіть при тривалому контакті з водою

ПЕВЩ є термостабільним полімером, але при температурах вище 120°C може почати розкладатися під впливом термоокислювальних процесів. При цьому виділяється вуглекислий газ і водяна пара. Щоб запобігти цьому, до складу можуть додаватися термостабілізатори, що підвищують стійкість поліетилену до високих температур, наприклад, фенольні чи фосфітні антиоксиданти:



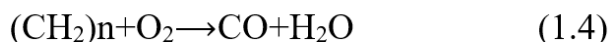
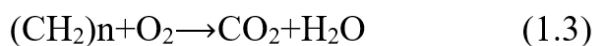
Завдяки високій інертності, ПЕВЩ не проводить електричний струм і має відмінні діелектричні властивості. Це дозволяє використовувати його як ізоляційний матеріал у виробництві кабелів та електронного обладнання.

ПЕВЩ не піддається корозії, що є важливою перевагою для застосувань в агресивних електрохімічних середовищах. Він має низьку стійкість до ультрафіолетового випромінювання, оскільки під його впливом починається окислення полімеру, що призводить до зниження міцності, втрати кольору і появи тріщин. Для захисту від цього процесу використовуються ультрафіолетові стабілізатори, які додаються до полімерної маси на етапі виробництва.

Озон є агресивним окиснювачем, здатним викликати розпад деяких полімерів, але поліетилен має відносно високу стійкість до його впливу. Однак, якщо відбувається реакція з озоном, це може призвести до утворення кисневмісних сполук на поверхні полімеру, наприклад, карбонільних груп, відбувається руйнування полімерного ланцюга з утворенням подвійних зв'язків:



При спалюванні ПЕВЩ виділяє в основному воду і вуглекислий газ, але при недостатньому доступі кисню може утворюватися також оксид вуглецю.



Таблиця 1.1 - Фізико-хімічні характеристики деяких марок ПЕВЩ

№	Найменування показника	Одиниця виміру	Норми для марок			
			271-70, 271-82, 271-83		273-71, 273-79, 273-80	
			Вищий сорт	Перший сорт	Вищий сорт	Перший сорт
1	2	3	4	5	6	7
1	Густина	г/см ³	0,950-0,955		0,957-0,964	
2	Показник текучості розплаву	г/10 хв	0,45-0,65	0,40-0,65	0,30-0,50	0,30-0,55

3	Розсіювання показників текучості розплаву в межах партії,	%, ≤	± 8	± 18	± 10	± 18
4	Кількість включень	шт., ≤	5	20	не нормується	не нормується
5	Масова доля золи	%, ≤	0,04	0,06	0,04	0,06
6	Масова доля летких речовин	%, ≤	0,09	0,10	0,09	0,10
7	Гранична текучість при розтягуванні	Па (кг·с/см ²) ≤	22,6 (230)	22,6 (230)	21,6 (220)	21,6 (220)
8	Міцність при розрив	Па (кг·с/см ²), ≥	29,4 (300)	21,6 (220)	24,5 (250)	20,6 (210)
9	Відносне подовження при розриві	%, ≥	770	770	770	550

1.3. Проблема накопичення поліетилену високої щільності та його вплив на навколишнє середовище та здоров'я людей.

ПЕВД широко використовується для виготовлення упаковок, пляшок, контейнерів, труб, будівельних матеріалів і навіть іграшок. За оцінками, світове виробництво поліетилену високої щільності досягає десятків мільйонів тон щорічно. Через його дешевизну, міцність і стійкість до впливу хімічних речовин, цей матеріал часто використовується для одноразових

продуктів, таких як пластикові пакети, упаковки для харчових продуктів, пляшки для напоїв, що сприяє його накопиченню в природі.

Частки ПЕВЩ і інші пластикові відходи є основною складовою пластикового сміття в океанах. Величезні скупчення пластикових відходів формуються у світовому океані. Океанічні течії збирають пластик в одне місце, де ці відходи повільно розпадаються на мікропластик, що шкодить морським організмам.

Мікропластик легко поглинається рибами та молюсками, що може призвести до накопичення токсичних речовин у харчовому ланцюгу, включаючи людину. Це має серйозні наслідки для здоров'я екосистем і потенційно може впливати на здоров'я людини через споживання забрудненої морської продукції.

ПЕВЩ виробляється з викопних джерел, зазвичай нафти або природного газу. Виробництво поліетилену включає видобуток, транспортування та переробку викопних палив, що супроводжується значними викидами парникових газів - вуглекислий газ і метан. Таким чином, зростання виробництва поліетилену збільшує вуглецевий слід і сприяє зміні клімату.

Накопичення поліетилену високої щільності та інших пластмас призводить до довготривалого забруднення землі, води та повітря. Багато видів дикої природи, включаючи птахів і морських тварин, страждають від випадкового споживання або заплутування в пластикових відходах, що призводить до їх загибелі.

Основною проблемою, пов'язаною з ПЕВЩ, є його здатність перетворюватися на мікропластик під дією механічних і природних чинників. Ці частинки можуть легко потрапляти у повітря, ґрунт і воду, а через них – і до людського організму. Встановлено, що мікропластик здатен накопичуватися в тканинах людського тіла через інгаляцію або споживання забрудненої їжі та води.

Окрім фізичного забруднення, що спричиняється частинками пластику, ПЕВЩ може виділяти шкідливі хімічні сполуки – фталати, бісфеноли та інші

добавки, які використовуються для поліпшення його властивостей. Ці речовини можуть викликати ендокринні порушення, через порушення в гормональній системі людини. Відомо, що навіть низькі концентрації подібних хімічних речовин можуть впливати на розвиток і функціонування органів, спричиняючи захворювання серцево-судинної, репродуктивної, імунної та нервової систем.

ПЕВІЩ за своєю структурою є хімічно стабільним, проте при розпаді або під впливом високих температур він здатен вивільняти низку токсичних сполук, наприклад, формальдегіди та акролеїн. Ці речовини мають канцерогенні властивості, а також можуть впливати на нервову систему, дихальні органи та викликати алергічні реакції. Тривалий контакт або вдихання продуктів розпаду такого пластику може підвищити ризик розвитку хронічних респіраторних захворювань, таких як астма, та збільшити вірогідність серцево-судинних розладів.

ПЕВІЩ як забруднювач довкілля здатен також поглинати та акумулювати токсичні сполуки з навколишнього середовища, зокрема важкі метали та стійкі органічні забруднювачі. У результаті мікропластик, що потрапляє у харчові ланцюги, збагачений цими токсинами, може мати накопичувальний ефект у вищих трофічних рівнях, включно з людиною. Дослідження вказують на можливість появи запальних процесів та оксидативного стресу, які здатні підвищувати ризик розвитку хронічних захворювань - діабет, атеросклероз тощо.

Значна кількість відходів ПЕВІЩ потрапляє до водних ресурсів, де він може поглинати токсичні речовини, пестициди, важкі метали та інші забруднювачі. Ці хімічні речовини при потраплянні у воду взаємодіють із мікропластиком, що значно підвищує їх концентрацію в організмі людини при споживанні риби та морепродуктів. Таким чином, наявність ПВІЩ у воді є додатковим джерелом хімічної токсикації організму, що може призводити до метаболічних розладів, порушення функцій печінки та нирок, а також впливати на роботу імунної системи.

Особливу небезпеку ПЕВЩ становить для дітей, вагітних жінок та людей із хронічними захворюваннями. Дослідження показують, що вплив мікропластику та хімічних сполук ПЕВЩ на організм дитини може впливати на розвиток ендокринної системи та імунітету, а також підвищувати ризик порушень когнітивного розвитку. Вагітні жінки, більш схильні до токсичних сполук ПЕВЩ, можуть мати ризики для плоду, зокрема зниження ваги при народженні та затримки у розвитку.

В Україні значна частина поліетиленових відходів накопичується на відкритих сміттєзвалищах, що нерідко порушують екологічні стандарти. В умовах довготривалого зберігання на відкритому повітрі поліетилен піддається дії сонячного випромінювання та температурних коливань, що сприяє його механічному руйнуванню на дрібні фрагменти. Ці мікропластикові частинки разом із дощовою водою можуть проникати у ґрунт і з часом потрапляти у підземні води.

У процесі опадів частинки ПЕВЩ із забруднених територій змиваються у дренажні системи та водойми, особливо поблизу промислових зон і населених пунктів, де скупчуються відходи. Це призводить до значного забруднення річок і озер, що загрожує екосистемам і створює потенційну небезпеку для живих організмів.

Основним методом поводження з відходами ПЕВЩ залишається захоронення на полігонах. Через повільний процес розкладу поліетилену, цей метод створює довготривалу проблему накопичення пластику у ґрунті, що призводить до деградації землі та забруднення підземних вод токсичними сполуками. Захоронення пластику на полігонах також є ризикованим з огляду на можливість випадкового загоряння, під час якого виділяються небезпечні речовини - діоксини і фурани.

В останні роки в Україні розвивається система сортування відходів, яка дозволяє виділяти ПЕВЩ для повторної переробки. Наприклад, в 2024 році на гроші інвесторів запрацював сміттєпереробний завод в Житомирі, завод щогодини переробляє до 15 тон сміття. Зокрема, компанії, що займаються

переробкою, збирають поліетиленові відходи, які потім очищуються, подрібнюються та проходять термічну обробку. Цей процес дозволяє отримувати вторинний матеріал, що використовується для виготовлення нових пластикових виробів. Однак рівень переробки ПВД в Україні залишається порівняно низьким через недостатню кількість підприємств із переробки пластику та низьку культуру сортування побутових відходів.

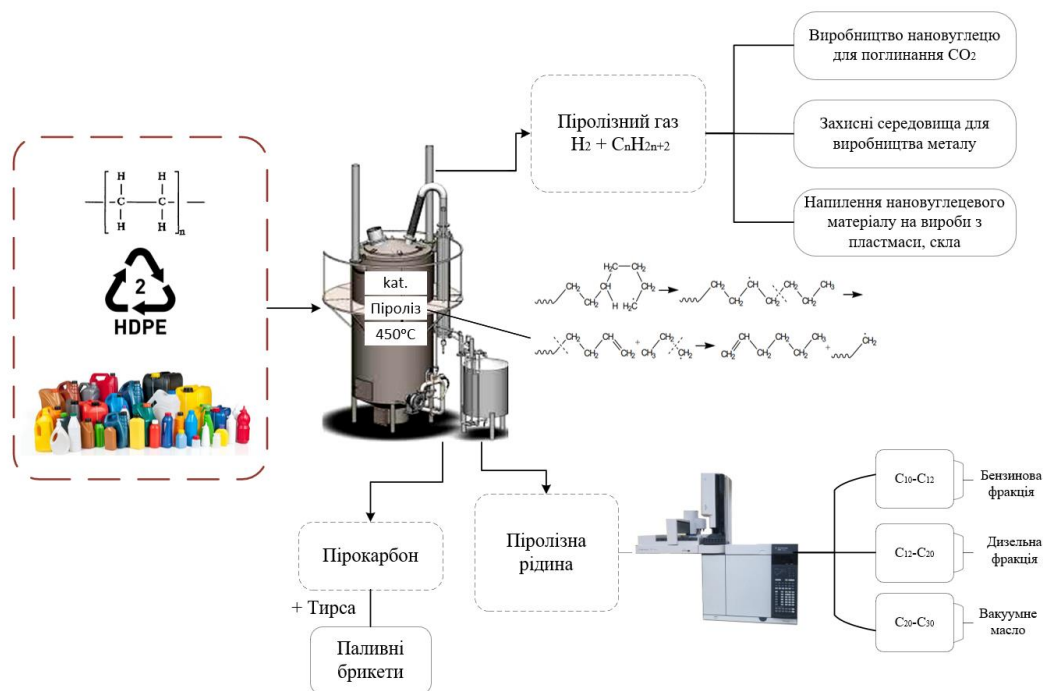


Рис. 1.2 - Переробка і подальше використання продуктів переробки поліетилену високої щільності.

В деяких регіонах України впроваджуються методи термічного розщеплення ПВД, які дозволяють перетворювати поліетилен на паливо або газ. Піроліз є однією з найперспективніших технологій, що дає змогу отримувати рідкі, газоподібні та тверді продукти з ПВД, які можуть використовуватися як джерела енергії або сировини. Проте висока вартість обладнання й відсутність державного стимулювання ускладнюють масштабне впровадження цих технологій.

1.4. Висновки до Розділу 1.

Переробка полімерних матеріалів є гострою проблемою не тільки в Україні, а і по всьому світі; адже їх хімічна структура утворена так, що під

дією природних чинників вона здатна перетворюватися на мікрочастинки, які можуть легко потрапляти у повітря, ґрунт і воду, а через них – і до людського організму. Рішення знайдено в переробці всіх полімерних матеріалів за допомогою каталітичного піролізу, що значно спрощує потрапляння шкідливих мікрочастинок як у природне середовище, так і до людини.

РОЗДІЛ 2

МЕТОДИ ТА ОБ'ЄКТИ ДОСЛІДЖЕНЬ

2.1. Звичайний піроліз.

Піроліз поліетилену високої щільності (ПЕВЩ) може відбуватися у двох основних режимах: звичайному та швидкому. Основна різниця між ними полягає в швидкості нагріву, температурному режимі, виході продуктів та їх складі.

Реакція піролізу, яка відбувається при помірній температурі, що дорівнює 450 °С здатна скоротити час реакції, споживати менше енергії, а кінцевим продуктом є газоподібні матеріали, більш легкі вуглеводні та маслянистий матеріал. Вихід газу зростає при підвищенні температури.

При термічному розкладанні пластику одночасно протікають два типи реакцій. Перша є випадковим розривом хімічних зв'язків, що призводить до зміни молекулярної маси і відновлення структури полімеру. Друга реакція пов'язана з розривом подвійних вуглецевих зв'язків, що призводить до утворення летких сполук. Аналіз складу та продуктів піролізу дозволяє зрозуміти механізми термічного розпаду полімерів.

Розкладання полімерів може відбуватися двома шляхами: механізм розриву ланцюга на кінцях молекули або випадкового розпаду всередині полімерної структури. У разі розкладання на кінцях ланцюга відбувається послідовне вивільнення мономерних ланок, що також називають деполімеризації. Цей процес протікає за вільнорадикальним механізмом і є зворотним етапом полімеризації.

За такого типу розкладання молекулярна маса полімеру поступово зменшується, а основний продукт реакції – мономери. Даний механізм можливий, якщо основні зв'язки у полімері слабші, ніж зв'язки бічних груп. Він спостерігається тільки у полімерних молекул, що мають активні кінцеві групи, такі як вільні радикали, катіони або аніони.

2.2. Швидкий піроліз

Швидкий піроліз представляє собою термічний розклад органічних сполук за відсутності кисню, що відбувається при температурі приблизно 450°C і за доволі короткий проміжок часу. При цьому процесі полімерні ланцюги розпадаються, утворюючи газоподібні (H_2 , CO , CO_2 , CH_4 , C_2H_6 тощо), рідкі продукти, як от піролізне масло, але більше за все тверді залишки, серед яких знаходиться пірокарбон, який складається з елементарного вуглецю та мінеральних домішок.

Особливістю процесу є формування пірокарбону – твердої вуглецевої речовини, яка утворюється внаслідок неповного розкладу органічних полімерів та подальшої полімеризації вуглецевих радикалів. Каталізатори відіграють важливу роль у регулюванні процесу розкладу та сприяють прискоренню реакцій утворення пірокарбону.

Каталізатор — це речовина, яка вступає в хімічну реакцію та виходить з неї без змін, збільшуючи ймовірність цієї реакції. Каталізатор утворює нестабільний комплекс з реагентами, який на наступному етапі розпадається на необхідні продукти та каталізатор. Енергія активації цих процесів нижча, ніж енергія активації некаталізованих реакцій. Зниження енергії активації дозволяє проводити реакції в більш м'яких умовах, наприклад, при більш низьких температурах або при нормальному атмосферному тиску. Каталіз не зміщує рівноваги реакції, а лише прискорює її встановлення.

Коли температура реактора досягає 350–400°C, починається руйнування полімерного ланцюга ПЕВІЩ - розрив хімічних зв'язків C–C у полімерному ланцюзі та розпад на низькомолекулярні фрагменти, переважно на алкани, алкени та ароматичні сполуки. Відбувається утворення вільних радикалів – активних частинок, які можуть вступати в подальші реакції.

При досягненні температури 450°C відбувається дегідрогенізація – видалення водню з органічних залишків, особливо цей процес прискорюється за допомогою використання металевих каталізаторів, формування стабільних циклічних структур і в кінцевому результаті - утворення твердого

пірокарбону. Каталізатори Fe_3O_4 , Fe_2O_3 сприяють утворенню організованих вуглецевих наноструктур, а саме нанотрубок та нановібрил.

Отриманий пірокарбон має високий вміст вуглецю (>80%), пористу структуру, високу термічну та хімічну стійкість, електропровідність.

2.3. Піролізна установка

На першому етапі в реактор (2) завантажується подрібнений поліетилен високої щільності. Для ініціювання процесу піролізу необхідно поступово підвищувати температуру. Це здійснюється за допомогою латра (1), який регулює електричну напругу, що подається на нагрівальний елемент реактора.

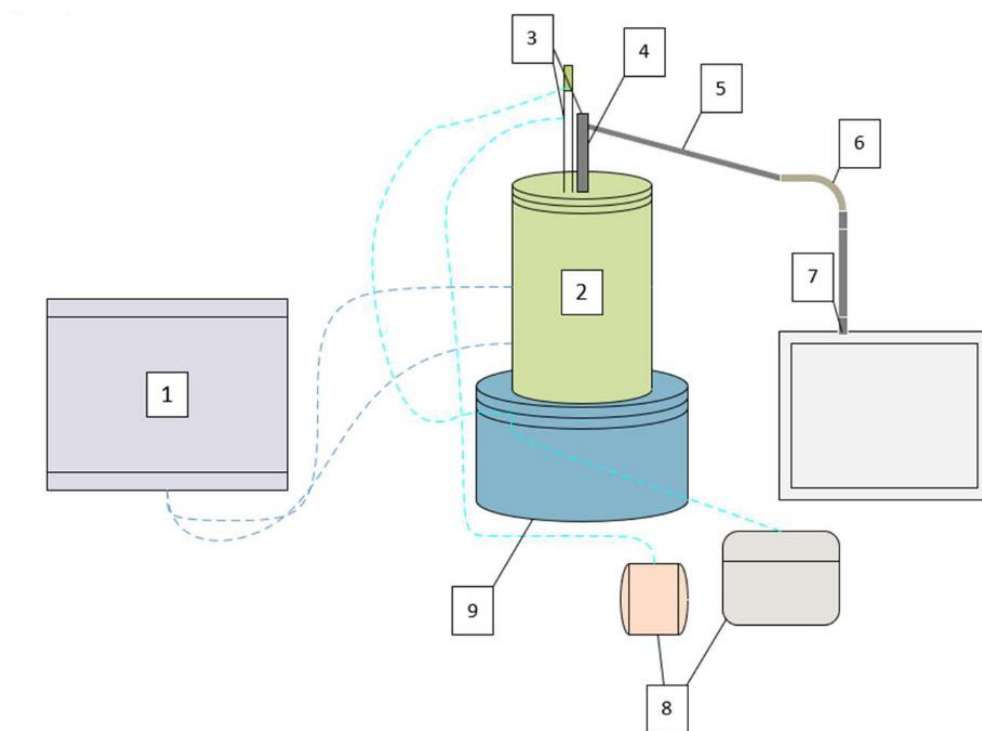


Рис. 11 - Установка перегонки піролізної рідини. 1 – ЛАТР; 2 – реактор; 3 – термопары; 4 – ректифікаційна колонка; 5 – повітряний холодильник; 6 – алонж; 7 – приймач; 8 – датчики температури; 9 – підставка/термоізолятор до реактора.

Контроль температури в процесі піролізу є критично важливим. Для цього використовується термопара (3), яка встановлюється всередині реактора

і вимірює поточну температуру, а також датчик температури (8), що допомагає підтримувати потрібний режим розкладу полімеру.

Гази, що утворюються в результаті розкладу ПЕВЩ, надходять у ректифікаційну колонку (4), де відбувається поділ речовин залежно від їх температури кипіння. Далі газоподібні продукти потрапляють у повітряний холодильник (5), де вони охолоджуються. Завдяки зниженню температури відбувається конденсація парів, і рідкі фракції починають осідати. Після охолодження продукти проходять через алонж (6), який слугує з'єднувальним елементом між холодильником і приймачем рідких фракцій.

Конденсовані рідкі продукти накопичуються у приймачі (7), де збирається основний цільовий продукт – піролізне масло. Його подальша очистка та фракціонування дозволяють отримати окремі компоненти, такі як дизельні фракції, бензинові компоненти та важкі маслянисті залишки.

Упродовж всього процесу датчик температури (8) забезпечує контроль температурного режиму, що дозволяє регулювати умови піролізу.

2.4. Підготовка каталізаторів

1. H_Y

Цеоліт Y у водневій формі (H_Y) отримували шляхом іонообмінної обробки вихідного цеоліту NaY. Для цього NaY суспендували у 1 М розчині NH₄Cl із співвідношенням 10 мл розчину на 1 г цеоліту при температурі 80 °C протягом 8 годин за інтенсивного перемішування. Після завершення процесу матеріали промивали дистильованою водою до досягнення нейтрального значення pH 7–8. Сушіння проводили при 100 °C протягом ночі, після чого здійснювали кальцинацію при 300 °C протягом 6 годин.

2. Аскарит

Аскарит є готовим промисловим сорбентом. Він представляє собою азбест, просочений плавленням NaOH, і характеризується високою сорбційною ємністю по CO₂ та воді. Матеріал не підлягає регенерації та використовується без додаткової активації чи обробки.

3. Fe_3O_4

Комерційний бренд Thermo Scientific, чистота $>97\%$, розмір частинок 325 mesh, ~ 44 мкм. Використовувався у якості каталізатора без додаткової підготовки.

4. Fe_2O_3

Комерційний бренд Thermo Scientific, кваліфікація «pure», чистота $>95\%$.

5. Ni/CaO

Каталізатор Ni/CaO із вмістом Ni 40 % готували шляхом розчинення 23,6 г $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$, 19,4 г $\text{Ni}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ та 20 г лимонної кислоти у 200 мл води. Отриманий розчин випаровували при 120°C до формування гелю, який потім кальцинували при 700°C протягом 5 годин. Такий підхід забезпечує рівномірне нанесення Ni на носій і формування активного каталізатора з високою дисперсністю металу.

6. Ni/MgO

Каталізатор Ni/MgO із вмістом Ni 50 % готували шляхом розчинення 3,88 г $\text{Ni}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, 5,12 г $\text{Mg}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ та 4 г лимонної кислоти у 40 мл води. Розчин випаровували при 120°C до утворення гелю, який потім кальцинували при 700°C протягом 5 годин. Це дозволяє отримати каталізатор із високою дисперсністю Ni на основі MgO, придатний для активації процесів піролізу.

2.5. Хроматографічний аналіз

Хроматографічний аналіз — це аналітичний метод, призначений для розділення, ідентифікації та кількісного визначення компонентів складних сумішей. Принцип методу полягає у різній взаємодії речовин суміші з рухомою та нерухомою фазами, що дозволяє визначити склад газів, рідин та твердих матеріалів із високою точністю.

Газовий хроматограф Agilent Technologies 7890A функціонує на основі принципу розподільної хроматографії, що дозволяє розділяти складні суміші

на індивідуальні компоненти та аналізувати їх кількісний і якісний склад. Установка складається з кількох основних компонентів, що забезпечують послідовний процес аналізу: системи введення зразка, газ-носія, хроматографічної колонки, печі для підтримання температурного режиму, детекторів і програмного забезпечення для обробки отриманих даних.

Процес починається із введення зразка, що реалізується через спліт - інжектор. Введений зразок випаровується та змішується з інертним газом-носієм, який транспортує його через колонку. Газ-носіє повинен бути високої чистоти, щоб запобігти утворенню сторонніх домішок під час аналізу. Далі обирається нерухома фаза, що представлена покриттям внутрішньої поверхні хроматографічної колонки. Взаємодія компонентів суміші з нерухомою фазою визначає їх швидкість руху через колонку, що сприяє їх розділенню.

Температурний контроль у печі хроматографа є ключовим параметром, оскільки він впливає на процес розділення. Температурний режим є ізотермічним, а ця функція забезпечує кращу роздільну здатність для компонентів із широким діапазоном точок кипіння.

Компоненти зразка, що виходять із колонки, виявляються детекторами, які генерують сигнали, пропорційні концентрації аналітів. Використовується Thermal Conductivity Detector (TCD) - універсальний детектор, що вимірює зміни теплопровідності газу.

Сигнали від детекторів перетворюються у вигляді хроматограми-графіка, де кожен пік відповідає окремому компоненту суміші. Час утримання, тобто час проходження компонента через колонку, використовується для його ідентифікації, а площа піка корелює з концентрацією аналіту.

Зібрані дані обробляються за допомогою програмного забезпечення Agilent OpenLab.

2.6. Висновки до Розділу 2.

В розділі було описано методи, які використовувалися при проведенні дослідження, аналіз даних, матеріали. Звичайний піроліз характеризується

низькою швидкістю нагріву та тривалим часом перебування матеріалу у високотемпературному середовищі. Швидкий піроліз відрізняється високою швидкістю нагріву та коротким часом реакції. Хроматографічний аналіз дозволяє визначити склад газів, рідин та твердих матеріалів із високою точністю. Каталізатори, які були використані в дослідженні: НУ, Fe_3O_4 , Ni/MgO , Ni/CaO , Fe_2O_3 , Аскарит.

РОЗДІЛ 3

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА ЧАСТИНА ТА АНАЛІЗ ОТРИМАНИХ РЕЗУЛЬТАТІВ

3.1 Результати процесу швидкого піролізу.

3.1.1 Матеріальний баланс швидкого піролізу.

Виконана робота по швидкому піролізу поліетилену високої щільності, з використанням під час процесу наступних каталізаторів: 1) НУ, 2) Fe_3O_4 , 3) Ni/MgO , 4) Ni/CaO , 5) Fe_2O_3 , 6) Аскарит.

Таблиця 3.1 - Матеріальний баланс

Завантаження № п.п.	Найменування	m_1 , г.	m_2 , г.	m_3 , г.	m_4 , г.	$V_{\text{газ}}$, мл.	Час, год.
1	ПЕВЩ	100	-	17,55	73,47	2000	4,08
2	ПЕВШ + НУ	100	2,5	10,53	86,08	1000	3,43
3	ПЕВЩ + Fe_3O_4	100	2,5	20,79	73,79	2000	3,53
4	ПЕВЩ + Ni/MgO	100	2,5	31,74	63,00	1500	4,10
5	ПЕВЩ + Ni/CaO	100	2,5	34,09	59,50	2000	4,20
6	ПЕВЩ + Fe_2O_3	100	2,5	32,77	62,33	2000	4,16
7	ПЕВЩ + Аскарит	100	2,5	36,00	57,05	2000	4,40

де: m_1 – маса завантаження;

m_2 – маса каталізатора;

m_3 – маса рідкої фракції;

m_4 – маса залишку/пірокарбону.

На основі проведеного матеріального балансу встановлено, що піроліз поліетилену високої щільності за відсутності каталізаторів забезпечує одержання 17,55 г рідкої фракції та 73,47 г пірокарбону. Додавання каталізаторів істотно впливає на продуктивний розподіл, загальний вихід конденсованих фракцій та швидкість процесу.

Найвищий вихід рідкого продукту зафіксовано при використанні Аскариту - 36,00 г, що супроводжується найнижчим виходом твердої фази всього лише 57,05 г та стабільним газоутворенням - 2000 мл. Подібну тенденцію показали каталізатори Ni/CaO, який забезпечив 34,09 г рідкої фракції, та Ni/MgO - 31,74 г. Це вказує на їхню високу активність у напрямі дегідрогенізаційно-структурних перетворень полімерного ланцюга.

Найнижчий вихід рідкого продукту - 10,53 г. Каталізатор НУ сприяє утворенню більш конденсованого вуглецевого залишку. Найбільше виходу пірокарбону також утворювалося при використанні каталізатора Fe₃O₄.

Узагальнені графіки залежностей температури реактора та пару від часу з використанням різних каталізаторів при піролізі наведені нижче.

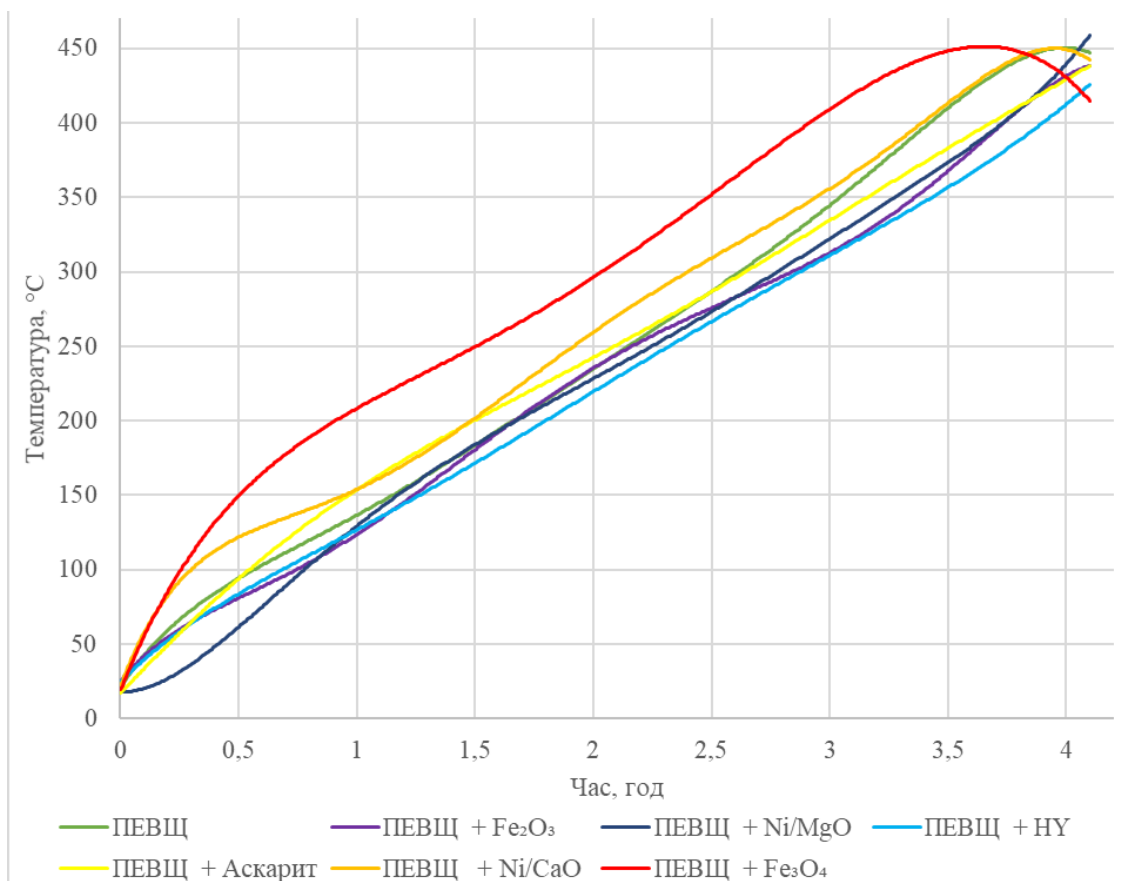


Рис. 3.1 - Залежність температури пари від часу піролізу ПЕВЩ з використанням різних каталізаторів.

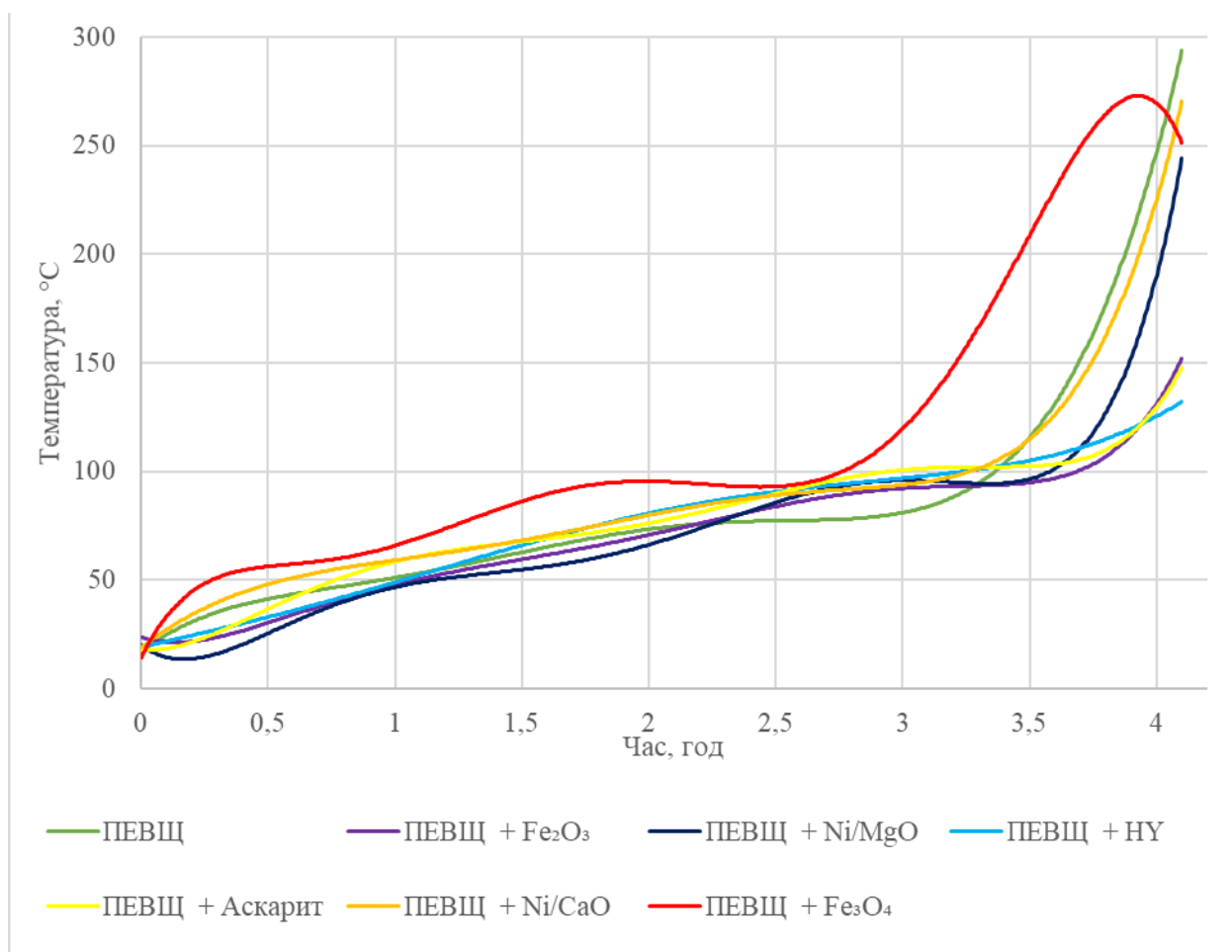


Рис. 3.2 - Залежність температури реактора від часу піролізу ПЕВЩ з використанням різних каталізаторів.

3.1.2 Результати хроматографічного аналізу

Отримані результати відображені графічно – у вигляді таблиці та хроматограм. Таблиця показує якісний та кількісний склад газової фракції, утвореної під час процесу піролізу. Результати хроматографа доповнюють таблицю і дають графічну візуалізацію складу газової фракції.

Таблиця 3.2 - Результати хроматографічного аналізу продуктів піролізу ПЕВЩ+кат.

Проба	% (мас.)												
	Н ₂	СО	СО ₂	Метан	Етан	Пропан	Бутан	Пентан	Ізо-бутан	Ізо-пентан	Ізо-гексан	Метанол	Етанол
1. ПЕВЩ	0,68	25,02	21,23	5,36	15,73	24,53	6,54	0,46	-	0,46	0,42	0,01	-
2. ПЕВЩ + НУ	0,48	20,49	43,77	2,60	7,99	14,73	4,11	0,22	4,94	0,33	0,30	0,01	0,04
3. ПЕВЩ + Fe ₃ O ₄	0,77	24,80	29,76	4,25	13,01	21,32	6,09	0,44	-	0,43	0,43	0,01	-
4. ПЕВЩ + Ni/MgO	0,64	23,19	32,80	3,58	12,25	20,35	6,44	0,67	-	0,56	0,60	0,02	-
5. ПЕВЩ + Ni/CaO	3,71	11,05	5,86	9,54	16,90	33,68	14,42	1,88	-	1,10	1,81	0,03	-
6. ПЕВЩ + Fe ₂ O ₃	0,54	20,81	24,09	4,98	15,27	24,88	7,41	0,73	-	0,58	0,68	0,02	-
7. ПЕВЩ + Аскарит	1,60	12,54	17,73	5,58	18,22	31,47	10,07	1,07	-	0,73	0,97	0,03	-

Хроматографічний аналіз газової фази засвідчив залежність газового складу від природи каталізатора:

-Найбільший вміст водню (3,71 %) було зафіксовано при використанні Ni/CaO, що свідчить про ефективність дегідрування;

-Найвищий вміст пропану (33,68 %) і бутану (14,42 %) також відповідав Ni/CaO, що вказує на його здатність сприяти утворенню розгалужених вуглеводнів;

-Найвищі концентрації CO₂ (43,77 %) виявлено у досліді з НУ, що свідчить про активацію реакцій декарбоксилування;

-Каталізатори Fe₂O₃ та Fe₃O₄ переважно сприяли формуванню C₂–C₃ вуглеводнів (етан, пропан), а також збільшували вміст окислювальних газів (CO, CO₂).

Результати хроматографічного аналізу газового хроматографа Agilent Technologies 7890A

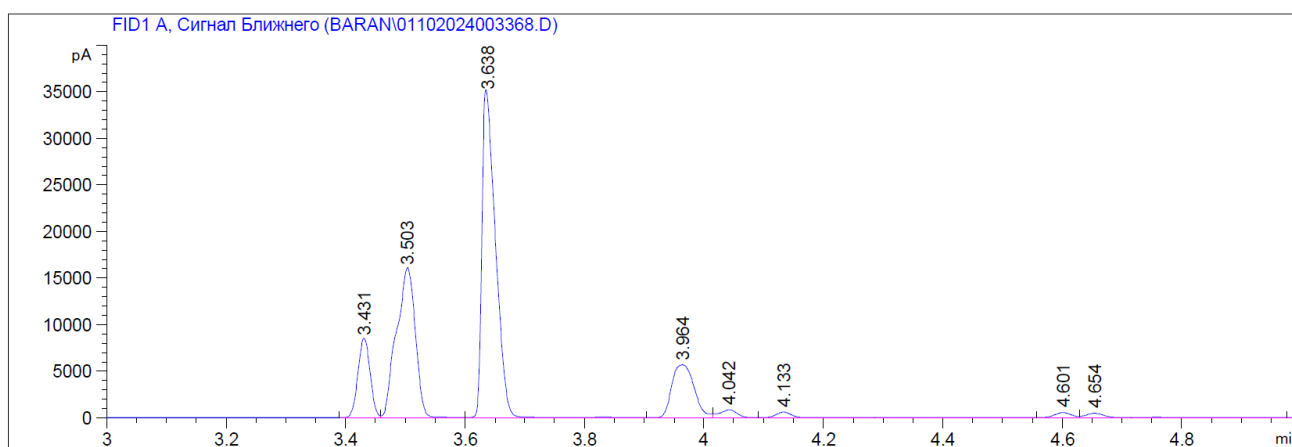


Рис. 3.3 - Хроматограма поліетилену високої щільності

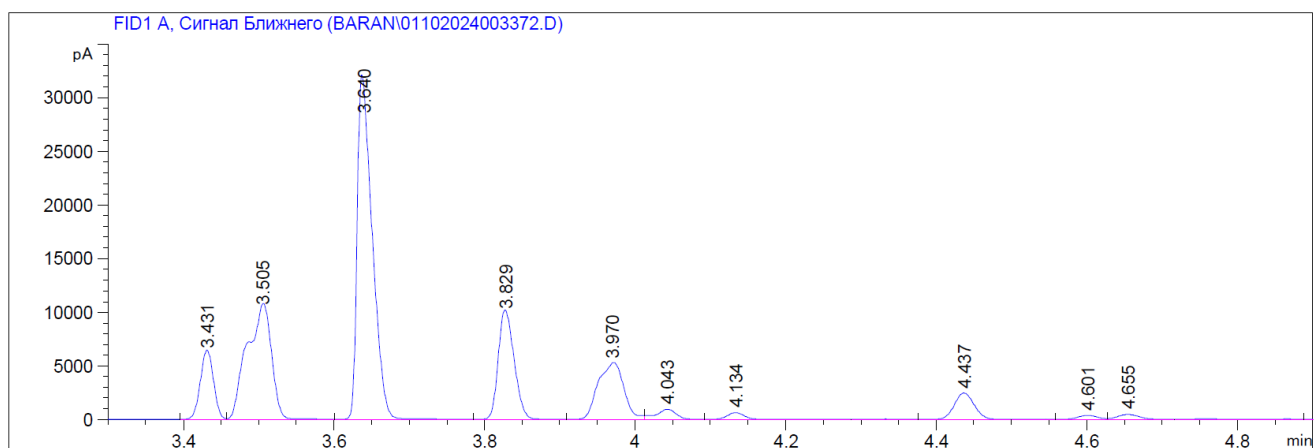


Рис. 3.4 - Хроматограма поліетилену високої щільності з використанням каталізатора НУ

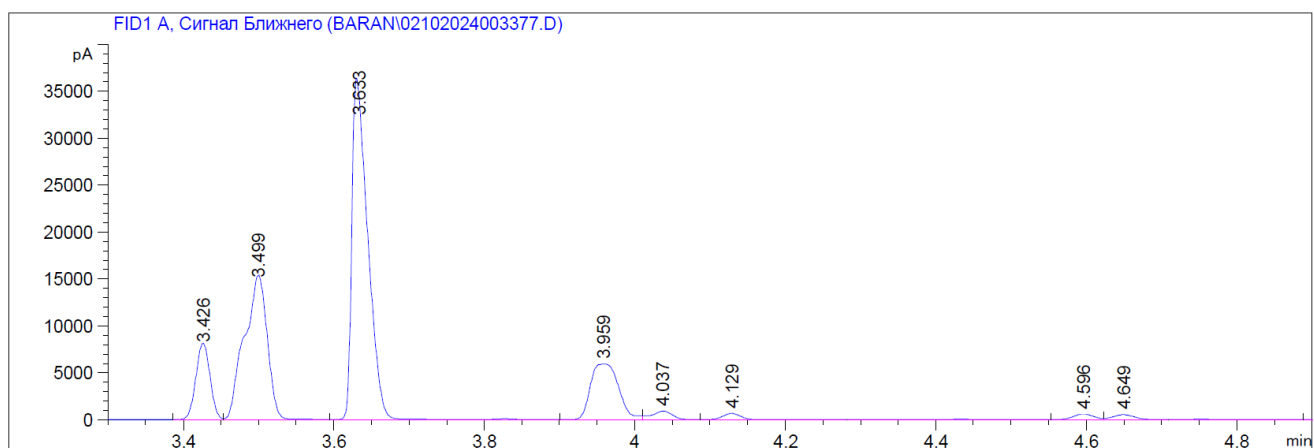


Рис. 3.5 - Хроматограма поліетилену високої щільності з використанням каталізатора Fe_3O_4

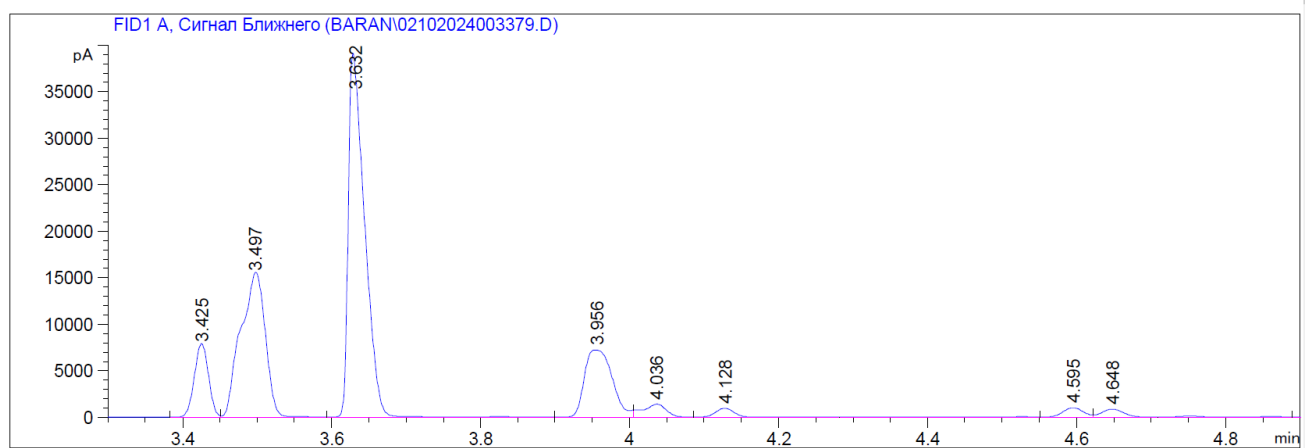


Рис. 3.6 - Хроматограма поліетилену високої щільності з використанням каталізатора Ni/MgO

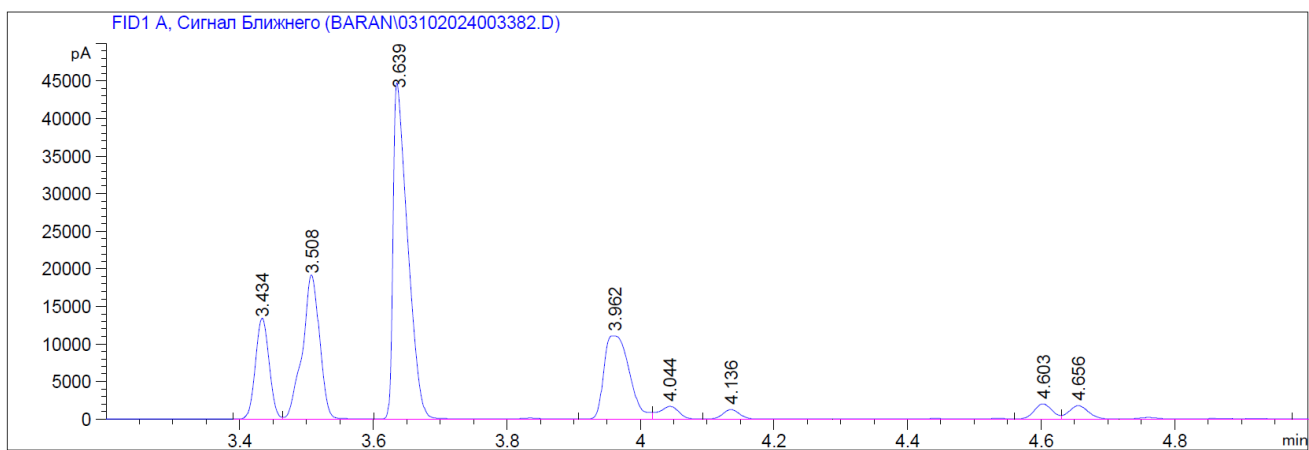


Рис. 3.7 - Хроматограма поліетилену високої щільності з використанням каталізатора Ni/CaO

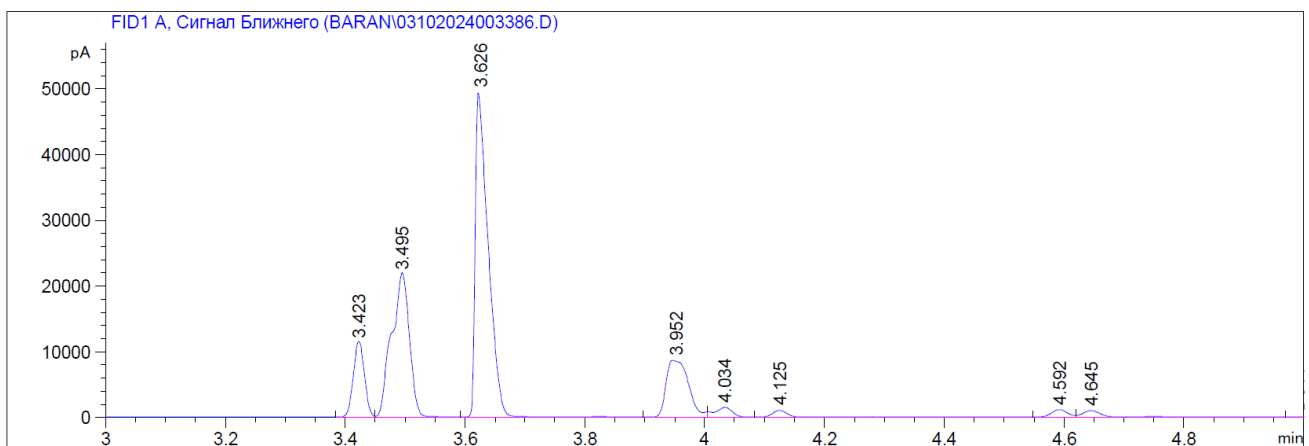


Рис. 3.8 - Хроматограма поліетилену високої щільності з використанням каталізатора Fe₂O₃

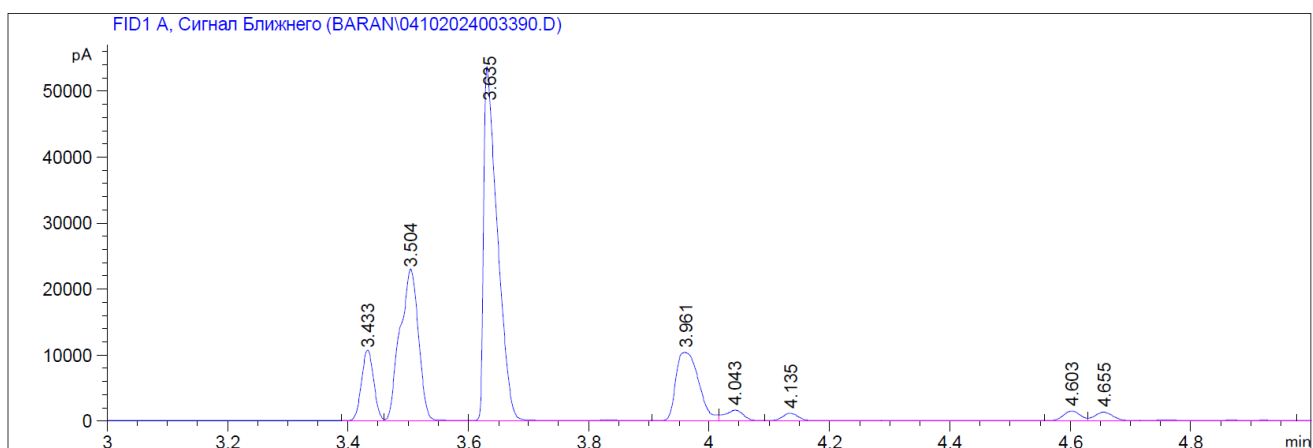


Рис. 3.9 - Хроматограма поліетилену високої щільності з використанням каталізатора Аскарит

Проаналізувавши серії хроматограм, отриманих під час піролізу поліетилену високої щільності у присутності різних каталізаторів, можна зробити висновок, що хроматограма відображає розподіл компонентів газової фракції піролізу за часом їх виходу з хроматографічної колонки, що дозволяє кількісно визначити склад утворених газів. Піки на хроматограмі є сигналами проб хімічних речовин. Висота піків відображає інтенсивність сигналу, а площа - концентрацію відповідного компонента в аналізованій суміші.

НУ каталізатор, характеризується найнижчою інтенсивністю основних піків. Так як розподіл піків нерівномірний, це підкреслює низьку селективність каталізатора рідких продуктів.

Хроматограма для каталізатора Fe_2O_3 подібна до Fe_3O_4 , вони демонструють помірні інтенсивності піків, стабільні, але не максимальну активність, що забезпечує середній вихід рідкої фази.

Каталізатор Ni/CaO вирізняється найінтенсивнішими піками серед усіх каталізаторів, що свідчить про високу концентрацію летких вуглеводнів у рідкій фракції. Роздільність піків є чіткою, що підкреслює структурну однорідність продуктів.

Фотографії отриманих продуктів піролізу в результаті звичайного каталітичного піролізу. Порівняння кінцевих продуктів реакції між різними процесами піролізу і різним використанням каталізаторів.



Рис. 3.10 - Кінцеві продукти реакції піролізу ПЕВЩ з використанням каталізатора Аскарит, зліва направо: пірокарбон, піролізна рідина.

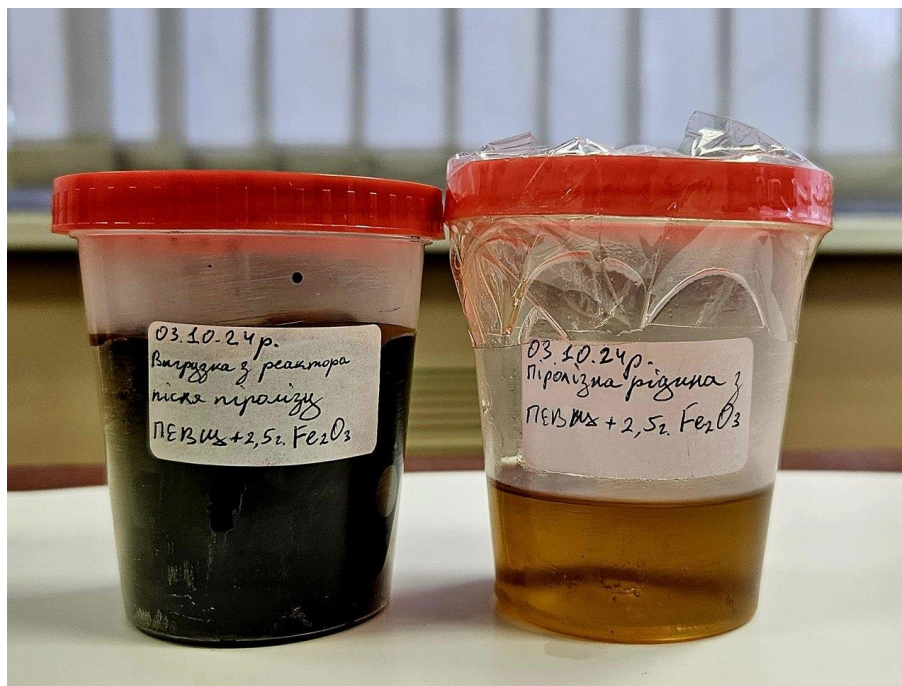


Рис. 3.11 - Кінцеві продукти реакції піролізу ПЕВЩ з використанням каталізатора Fe₂O₃, зліва направо: пірокарбон, піролізна рідина.



Рис. 3.12 - Кінцеві продукти реакції піролізу ПЕВЩ з використанням каталізатора Fe₃O₄, зліва направо: пірокарбон, піролізна рідина.

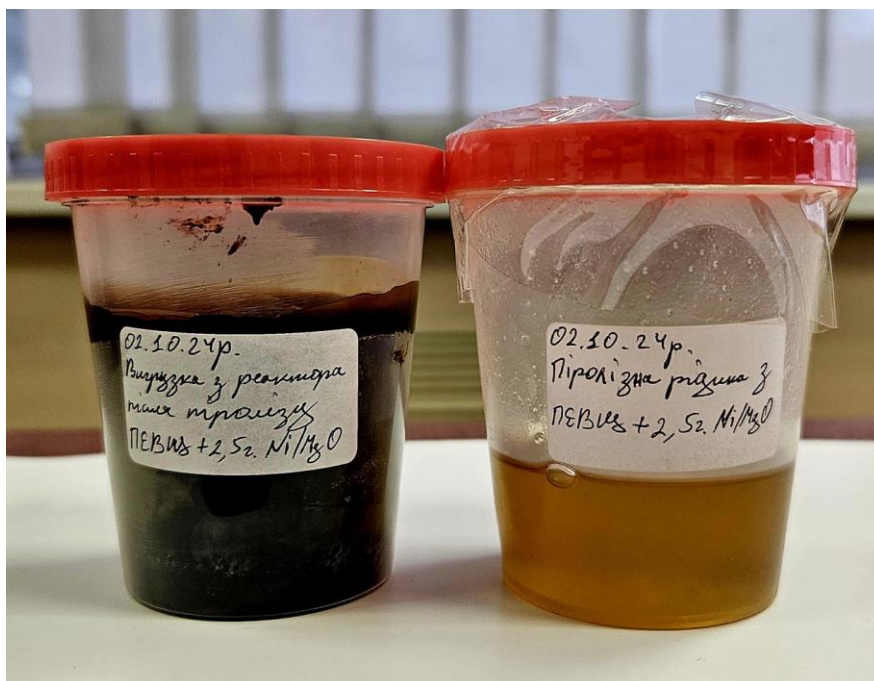


Рис. 3.13 - Кінцеві продукти реакції піролізу ПЕВЩ з використанням каталізатора Ni/MgO, зліва направо: пірокарбон, піролізна рідина.

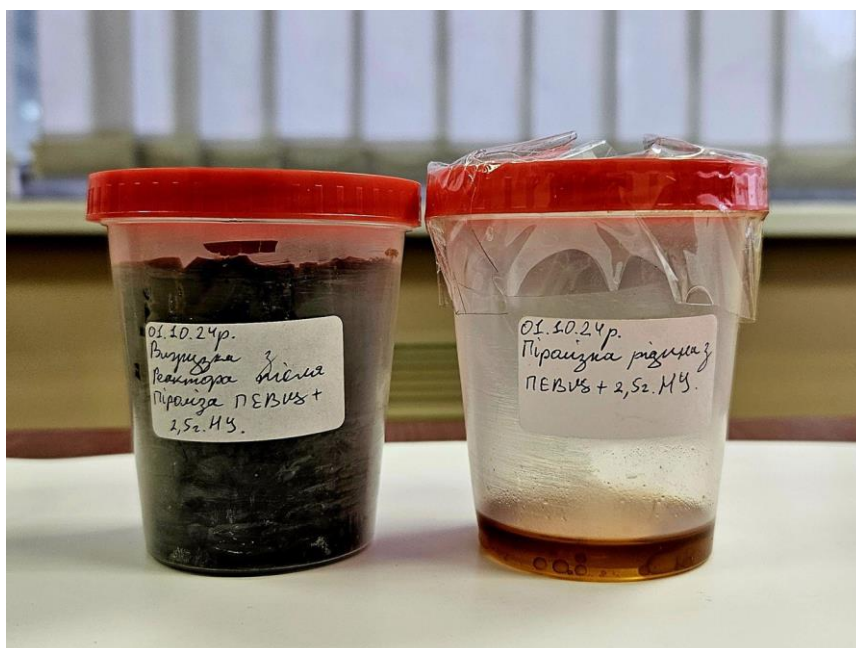


Рис. 3.14 - Кінцеві продукти реакції піролізу ПЕВЩ з використанням каталізатора НУ, зліва направо: пірокарбон, піролізна рідина.



Рис. 3.15 - Кінцеві продукти реакції піролізу ПЕВЩ без використання каталізатора, зліва направо: пірокарбон, піролізна рідина.

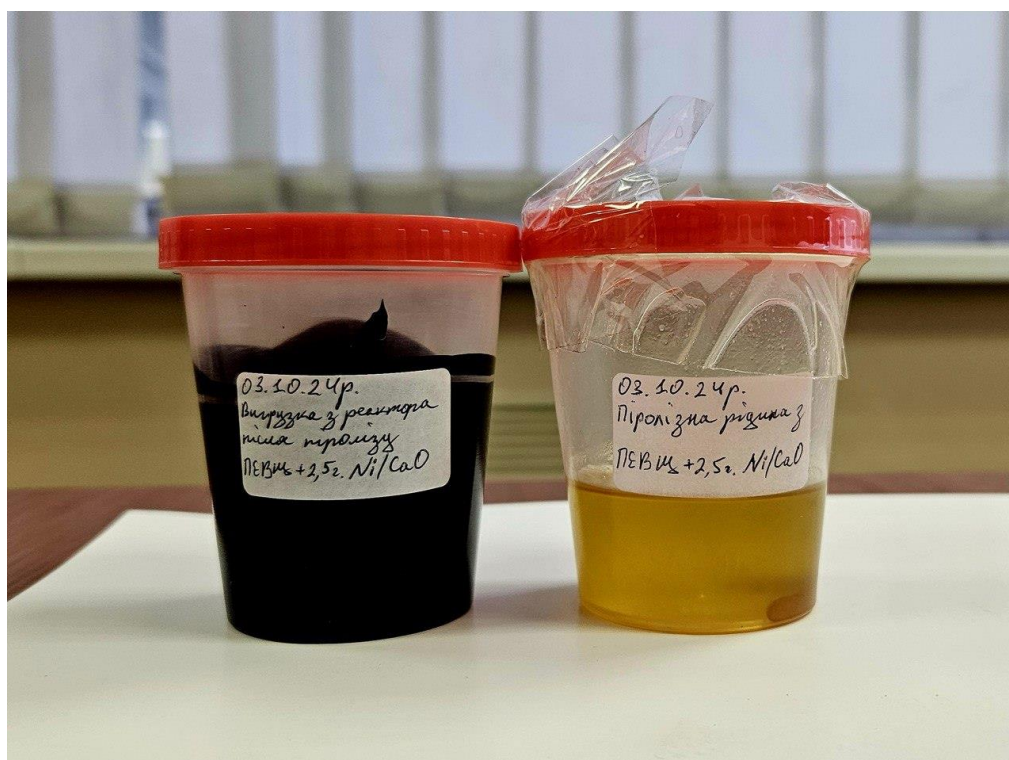


Рис. 3.16 - Кінцеві продукти реакції піролізу ПЕВЩ з використанням каталізатора Ni/CaO, зліва направо: пірокарбон, піролізна рідина.

Наведені вище фотографії дають змогу візуально оцінити вихід продуктів швидкого піролізу, здійснити якісну оцінку продуктів та визначити загальні тенденції виходу рідких і твердих продуктів, а також ширше подивитися на результати проведеного дослідю.

Найвищий вихід піролізної рідини спостерігається при використанні каталізаторів Аскарит, Ni/CaO, Ni/MgO, Fe₂O₃. Візуально відрізнити кількість пірокарбону за представленими зображеннями складно.

3.2 Результати звичайного піролізу

Виконана робота представлена у вигляді узагальнених результатів в форматі 8 таблиць. Швидкий піроліз поліетилену високої щільності з використанням під час процесу каталізаторів H₂, Fe₃O₄, Ni/MgO, Ni/CaO, Fe₂O₃, Аскарит.

Таблиця 1.4 - Матеріальний баланс піролізної переробки/ термодеструкції ПЕВЩ.

Завантажено					Завантажено				
№ п/п	Назва	г	мл	%	№ п/п	Назва	г	мл/л	%
1	ПЕВЩ	150,0	-	100,0	1	Піролізна рідина	104,5	112,0	69,7
2	-	-		-	2	Залишок	37,7	-	25,1
					3	Газ	3,3	-	2,2
					4	Втрати	4,5	-	3,0
3	Всього	150,0	-	100,0	5	Всього	150,0	-	100,0

Таблиця 1.3 - Матеріальний баланс піролізної переробки/термодеструкції ПЕВЩ в присутності каталізатора «H₂»

Завантажено					Завантажено				
№ п/п	Назва	г	мл	%	№ п/п	Назва	г	мл/л	%

1	ПЕВЩ	100,0	-	97,6	1	Піролізна рідина	65,5	84,5	63,9
2	НУ	2,5	-	2,4	2	Залишок	21,1	-	20,6
					3	Газ	12,8	-	12,5
					4	Втрати	3,1	-	3,0
3	Всього	102,5	-	100,0	5	Всього	102,5	-	100,0

Таблиця 2.4 - Матеріальний баланс піролізної переробки/термодеструкції ПЕВЩ в присутності каталізатора «Fe₃O₄»

Завантажено					Завантажено				
№ п/п	Назва	г	мл	%	№ п/п	Назва	г	мл/л	%
1	ПЕВЩ	100,0	-	97,6	1	Піролізна рідина	67,3	86,0	65,7
2	Fe ₃ O ₄	2,5	-	2,4	2	Залишок	11,7	-	11,4
					3	Газ	20,4	-	19,9
					4	Втрати	3,1	-	3,0
3	Всього	102,5	-	100,0	5	Всього	102,5	-	100,0

Таблиця 2.5 - Матеріальний баланс піролізної переробки/термодеструкції ПЕВЩ в присутності каталізатора «Ni/MgO»

Завантажено					Завантажено				
№ п/п	Назва	г	мл	%	№ п/п	Назва	г	мл/л	%
1	ПЕВЩ	100,0	-	97,6	1	Піролізна рідина	68,0	88,5	66,3
2	Ni/MgO	2,5	-	2,4	2	Залишок	16,5	-	16,1
					3	Газ	14,9	-	14,5

					4	Втрати	3,1	-	3,0
3	Всього	102,5	-	100,0	5	Всього	102,5	-	100,0

Таблиця 2.6 - Матеріальний баланс піролізної переробки/термодеструкції ПЕВІЩ
в присутності каталізатора «Ni/CaO»

Завантажено					Завантажено				
№ п/п	Назва	г	мл	%	№ п/п	Назва	г	мл/л	%
1	ПЕВІЩ	100,0	-	98,0	1	Піролізна рідина	68,6	89,0	67,2
2	Ni/CaO	2,04	-	2,0	2	Залишок	17,4	-	17,1
					3	Газ	12,9	-	12,6
					4	Втрати	3,1	-	3,0
3	Всього	102,04	-	100,0	5	Всього	102,04	-	100,0

Таблиця 2.7 - Матеріальний баланс піролізної переробки/термодеструкції ПЕВІЩ
в присутності каталізатора «Fe₂O₃»

Завантажено					Завантажено				
№ п/п	Назва	г	мл	%	№ п/п	Назва	г	мл/л	%
1	ПЕВІЩ	100,0	-	97,6	1	Піролізна рідина	65,9	87,0	64,3
2	Fe ₂ O ₃	2,5	-	2,4	2	Залишок	12,2	-	11,9
					3	Газ	21,3	-	20,8
					4	Втрати	3,1	-	3,0
3	Всього	102,5	-	100,0	5	Всього	102,5	-	100,0

Таблиця 2.8 - Матеріальний баланс піролізної переробки/термодеструкції ПЕВІЩ
в присутності каталізатора «Аскарит»

Завантажено					Завантажено				
№ п/п	Назва	г	мл	%	№ п/п	Назва	г	мл/л	%
1	ПЕВІЩ	100,0	-	97,6	1	Піролізна рідина	72,7	92,0	71,0
2	Аскарит	2,5	-	2,4	2	Залишок	13,4	-	13,0
					3	Газ	13,3	-	13,0
					4	Втрати	3,1	-	3,0
3	Всього	102,5	-	100,0	5	Всього	102,5	-	100,0

Порівняльний аналіз всіх таблиць матеріального балансу показує, що всі каталізатори підвищують інтенсивність реакцій піролізу, змінюючи співвідношення між рідкою, газовою та твердою фазами.

Каталізатор Аскарит є найбільш ефективним для отримання рідкої піролізної фракції, вихід продукту становить 71%, а це найвищий показник серед інших каталізаторів.

Каталізатори Fe_3O_4 , Fe_2O_3 і Ni/MgO , Ni/CaO демонструють середню активність в порівнянні з каталізатором Аскаритом. та збалансованість продуктів, тоді як НУ є найменш ефективним в порівнянні з ним.

Каталізатор НУ відрізняється від інших утворенням твердого залишку, його більш доцільно застосовувати в піролізу при меті отримання пірокарбону.

Узагальнені графіки залежностей температури реактора та пару від часу з використанням різних каталізаторів при низькотемпературному піролізі наведені нижче.

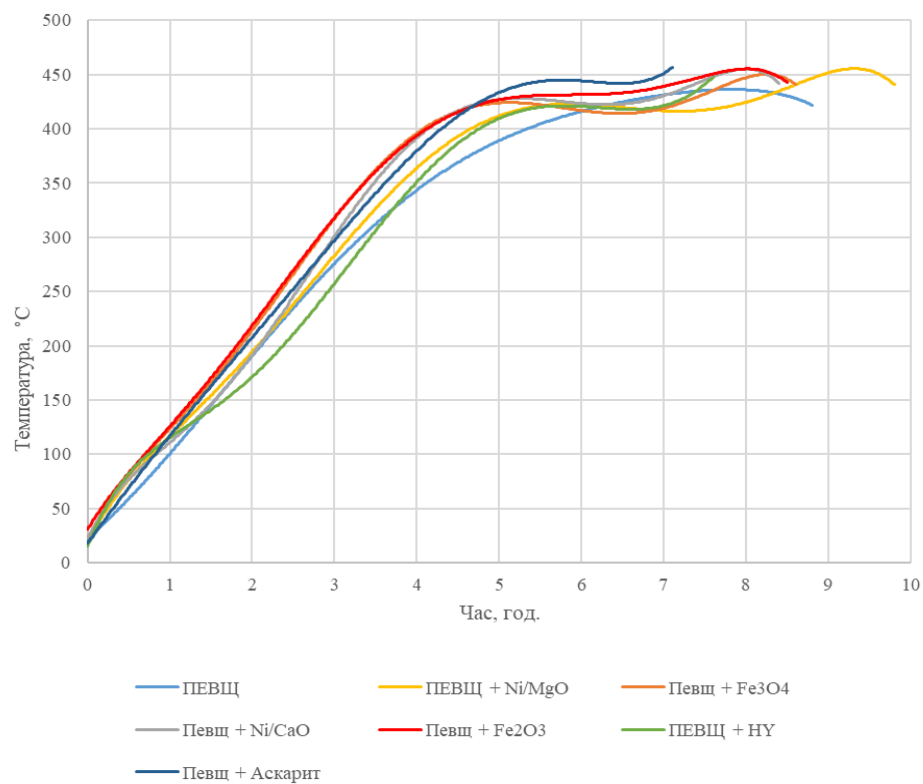


Рис 3.17 - Залежність температури реактора від часу піролізу ПЕВІЦ з використанням різних каталізаторів

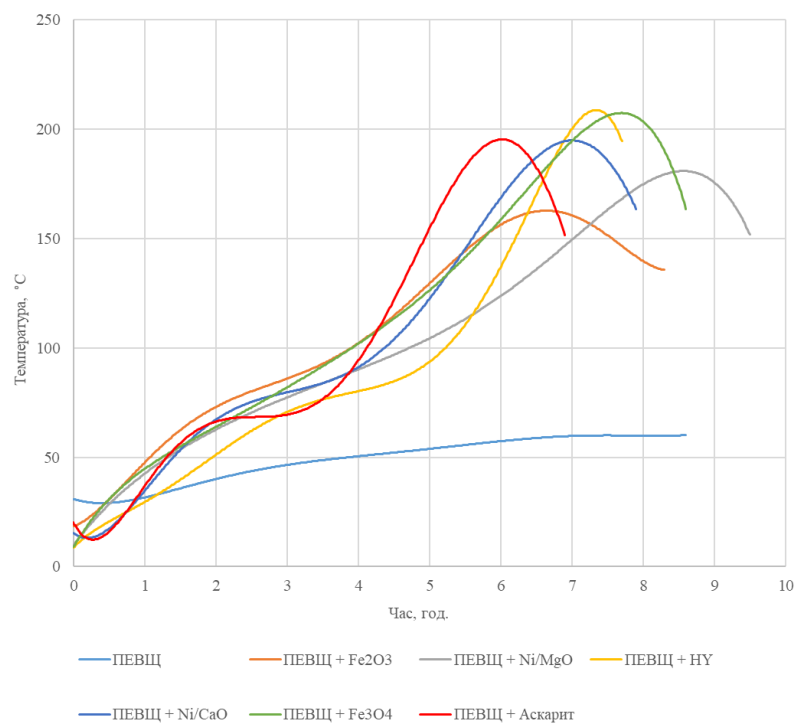


Рис. 3.18 - Залежність температури пари від часу піролізу ПЕВІЦ з використанням різних каталізаторів

З урахуванням рис 3.17 та рис. 3.18 можна сказати, що при звичайному піролізі температура пари у всіх каталізаторах різниться, швидко досягає пікових значень, що свідчить про інтенсивне і короткотривале розкладання ПЕВЩ. Каталізатор Аскарит найпершим забезпечує високу температуру пари, що пов'язано з його високою каталізаторною активністю. ПЕВЩ без каталізатора на графіку показано майже горизонтально, що свідчить про відсутність інтенсивних вторинних реакцій у паровій фазі. У цьому випадку процес термічного розкладу відбувається переважно за рахунок підведеного тепла, без суттєвого прискорення реакцій, що зумовлює стабільну температуру пари протягом часу експерименту.

3.3. Висновок до Розділу 3.

В результаті отриманих даних були зроблені наступні висновки.

При швидкому піролізі найвищий вихід піролізної рідини був досягнутий при використанні каталізатора Ascarite - 36,00 г. Найвищий вихід пірокарбону був досягнутий при використанні каталізатора НУ - 86,08 г. При звичайному піролізі найвищий вихід піролізної рідини був досягнутий при використанні каталізатора Ascarite - 72,7 г. Найвищий вихід пірокарбону був досягнутий при використанні каталізатора НУ - 21,1 г.

Якщо оцінювати продукти реакції в кількісному співвідношенні між піролізною рідиною і пірокарбоном, то при звичайному піролізі утворюється більше піролізної рідини, в той час як при швидкому піролізі – пірокарбон. Аналіз газової фази показав, що СО, СО₂ та пропану в кількісному співвідношенні утворюється більше порівняно з іншими газами представлені в табл. 3.1 даного розділу.

РОЗДІЛ 4

РОЗРОБКА СТАРТАП-ПРОЕКТУ

4.1. Опис ідеї проекту

Проект PyroPlast Energy впроваджує технологію каталітичного піролізу для переробки відходів поліетилену високої щільності та отримання комерційно придатних продуктів піролізу — піролізної рідини, піролізного газу та пірокарбону, які надалі реалізовуватимуться промисловим підприємствам. Процес базується на застосуванні каталізаторів, що забезпечують ефективне та швидке розкладання полімерних ланцюгів при оптимальних температурах, знижуючи енергетичні витрати та обсяг викидів.

Поліетилен високої щільності один із найкращих полімерів для піролізу, так як має високу енергетичну цінність та невеликий вміст домішок. Використання каталізаторів дозволяє прискорити процес піролізу. В залежності від вибору каталізаторів та методу піролізу можна контролювати кінцеві продукти реакції, так як їх співвідношення може коливатися між собою.

Планується співпраця з підприємствами, які, в процесі свого виробництва створюють значні обсяги HDPE-відходів, можливість пропонування їм вигідних умов: переробка пластику і отримання з переробки їхніх відходів продукт піролізу. Наприклад, піролізна рідина може бути використана як альтернативне паливо для дизельних генераторів або котлів. Пірокарбон буде реалізовуватися як сирована, яку при спеціальній обробці та додавання тирси можна використовувати як паливні брікети. Піролізний газ – для виробництва нановуглецю для поглинання CO₂, як захисне середовище для виробництва металу, як напилення нановуглецевого матеріалу на вироби з пластмаси та скла.

Спочатку опишемо основну ідею стартап-проекту, напрямки застосування та вигоди для користувача.

Таблиця 4.1 - Опис ідеї стартап-проекту

Зміст ідеї	Напрямки застосування	Вигоди для користувача
Стартап передбачає переробку пластикових відходів ПЕВЩ сучасним методом каталітичного піролізу, з подальшим виходом продуктів піролізу – піролізної рідини, піролізного газу та пірокарбону, які в майбутньому можна продавати як сировину компаніям, які цього потребують.	1.Промислові підприємства, які зацікавлені переробкою пластику 2.Підприємства, яким потрібна сировина	Користувач отримує сировину для подальшого використання у своїх процесах, зменшує залежність від традиційних ресурсів та покращує екологічну відповідальність підприємства.

Проект PyroPlast Energy ґрунтується на результатах наукових досліджень, що підтвердили ефективність каталітичного піролізу HDPE-відходів у лабораторних умовах. Запропонована технологія може бути адаптована до різних масштабів виробництва та обсягів утворення відходів.

Таблиця 4.2 - Визначення сильних, слабких та нейтральних характеристик PyroPlast Energy та його конкурентів

№ п/п	Техніко-економічні характеристики ідеї	Потенційні товари/концепції конкурентів				W (слабка сторона)	N (нейтральна сторона)	S (сильна сторона)
		Мій проект	Хімічна обробка ПЕВЩ	Механічне подрібнення ПЕВЩ	Захоронення ПЕВЩ			

Продовження таблиці 4.2

1	Ефективність обробки	Висока. технологія забезпечує комплексну термічну обробку відходів при температурі 450–600 °С, що дозволяє перетворювати значну частину полімерних матеріалів на корисні продукти та зменшувати обсяг залишків їх відходів	Середня. Ефективність залежить від чистоти та складу відходів, утворюються шлаки, залишки та побічні домішки, потребує контролю реакцій і нейтралізації залишків в	Низька. Відходи лише змінюють форму без перетворення на корисні продукти, і значна частина матеріалу залишається невикористаною, що потребує подальшої обробки.	Низька. Відходи не піддаються обробці та зберігаються у початковому вигляді, створюючи потенційні екологічні ризики.		+	
---	----------------------	--	--	---	--	--	---	--

Продовження таблиці 4.2

2	Вартість процесу	Середня. Витрати пов'язані з енерговитратами для каталітичного піролізу ПЕВІЦ (~500–600 °С) та обслуговуванням обладнання; не потребує дорогих реагентів.	Середня. В основному витрати йдуть на хімічні реагенти.	Низька. Технологія проста, основні витрати на обладнання для подрібнення та транспортування відходів.	Середня. В основному витрати на логістику.	+		
---	------------------	---	---	---	--	---	--	--

Продовження таблиці 4.2

3	Обсяг відходів після процесу	60–70% перетворюється на корисні продукти (рідина + газ); твердий залишок становить лише 20–30%, придатний до подальшого використання.	Утворюється приблизно 15–25% від початкової маси. Це може бути шлаки та осади, залишки використаних хімічних реагентів, які потребують нейтралізації, бо інакше це вважається небезпечним відходом, також водні розчини.	Утворюється 40–50% непридатного твердого залишку через низьку ефективність реакції.	Утворюється 50–60% твердих відходів, що повністю підлягають захороненню.			+
---	------------------------------	--	--	---	--	--	--	---

Сильними сторонами (S) даного стартапу є комплексна переробка ПЕВЩ з виробленням корисних продуктів, зменшення обсягу відходів, гнучкість у масштабуванні виробництва залежно від потреб ринку.

Слабкі сторони (W) це високі початкові інвестиції в обладнання та запуск технологічного процесу, необхідність спеціалізованого персоналу для управління процесом.

Нейтральними характеристиками (N) є вартість кінцевого продукту, вона визначається як середня на ринку альтернативних матеріалів і палив, а також ступінь ефективності залежить від якості вхідної сировини.

4.2. Технологічний аудит ідеї проекту

У рамках цього підрозділу слід провести оцінку технології, що забезпечує реалізацію ідеї проекту, з метою визначення її технічної здійсненності.

Таблиця 4.3 - Технологічна здійсненність ідеї проекту

№ п/п	Ідея проекту	Технології її реалізації	Наявність технологій	Доступність технологій
1	Переробка пластикових відходів (ПЕВЩ)	Каталітичний піроліз твердих пластикових відходів при температурі 450 °C	Технології відомі та застосовуються на промислових підприємствах	Обладнання та методики доступні, сировина забезпечена постачальниками

Продовження таблиці 4.3

2	Отримання високопористого пірокарбону для виготовлення паливних брикетів.	Термічна обробка піролізного залишку, активація вуглецевого матеріалу, додавання тирси, додаткове подрібнення та фракціонування пірокарбону з метою забезпечення однорідного гранулометричного складу	Технологія відома і може використовуватися для виробництва сорбентів, активованого вугілля та фільтрувальних матеріалів	Доступна для промислового застосування, матеріали та обладнання доступні.
3	Отримання піролізної рідини для використання як альтернативного палива	Конденсація летких продуктів каталітичного піролізу ПЕВЩ та стабілізація палива для подальшого використання	Технологія відома, але не використовується широкими масами.	Обладнання та методики доступні для впровадження
4	Отримання піролізного газу для використання у виробництві функціональних вуглецевих матеріалів та спеціалізованих газових середовищ промислового призначення	Очищення, охолодження, конденсація важких фракцій та сепарацію з метою стабілізації складу.	Технологія відома, але не використовується широкими масами.	Обладнання та методики доступні для впровадження

Продовження таблиці 4.3

Обрана технологія переробки ПЕВЩ за допомогою каталітичного піролізу забезпечує ефективне зменшення обсягу пластикових відходів і отримання піролізної рідини, піролізного газу та пірокарбону. Проект дозволяє створювати цінні продукти для промисловості та реалізовує екологічно безпечне поводження з відходами, що робить його перспективним для масштабного впровадження.

У висновку можна сказати, що технологічна реалізація проекту PyroPlast Energy є цілком можливою при наведених пунктах таблиці 4.3.

4.3. Аналіз ринкових можливостей запуску стартап-проекту

В підрозділі виявляються сприятливі ринкові умови для впровадження проекту та фактори зовнішнього середовища, що можуть ускладнити його реалізацію, формування обґрунтованої стратегії розвитку з урахуванням специфіки ринку, потреб цільових користувачів і конкурентних пропозицій.

На початковому етапі здійснюється дослідження попиту, що включає оцінку його наявності, масштабів та тенденцій розвитку ринку.

Таблиця 4.4 - Попередня характеристика потенційного ринку стартап-проекту

№ п /п	Показники стану ринку (найменування)	Характеристика
1	Кількість головних гравців, од.	10–20
2	Загальний обсяг продаж, грн / ум. од.	Орієнтовно 500 тис. грн
3	Динаміка ринку (якісна оцінка)	Позитивна. Зростання попиту з кожним роком.
4	Наявність обмежень для входу (характер обмежень)	Висока вартість обладнання і пуску установки, потреба в стабільних процесах піролізу та контролі викидів.

Продовження таблиці 4.4

5	Специфічні вимоги до стандартизації та сертифікації	Дозвіл на операції у сфері поводження з відходами. Виконання ДСТУ/ISO з охорони довкілля (ISO 14001), енергоефективності (ISO 50001). Вимоги до атмосферних викидів. Відповідність технічним умовам.
6	Середня норма рентабельності в галузі, %	70

За результатами аналізу ринок можна вважати привабливим для входу, конкуренція помірна, а правові вимоги та тренд на екологічність створюють сприятливі умови для впровадження проекту.

На наступному етапі ідентифікуються цільові сегменти споживачів, визначаються їх ключові характеристики та узагальнюються основні вимоги до продукції для кожної з виділених груп.

Таблиця 4.5 - Характеристика потенційних клієнтів стартап-проекту

Потреба, яку формує ринок	Цільова аудиторія	Відмінності у поведінці потенційних клієнтів	Вимоги споживачів до товару
Переробка пластику	Промислові підприємства, малий та середній бізнес.	Методи зменшення відходів та виконання екологічних норм.	Прозорі умови та ціни, екологічна відповідність, гарантія повного та безпечного знешкодження
Альтернативне енергетичне паливо	Промислові підприємства, малий та середній бізнес.	Орієнтир на низьку ціну	Склад продукту, відповідність технічним вимогам

Продовження таблиці 4.5

Матеріал для виготовлення паливних брикетів.	Промислові підприємства, малий та середній бізнес.	Ефективність, мінімальні витрати	Висока сорбційна здатність, стабільність властивостей, екологічна безпека
Піролізний газ як технологічна сировина	Промислові підприємства металургійного профілю	Ефективність, мінімальні витрати	Склад газу, відсутність агресивних домішок, безпечність використання

Згідно інформації в таблиці 4.5 стартап-проект розкриває можливості для охоплення різних сфер діяльності.

Наступна таблиця розкриває інформацію про фактори загроз. фактори можливостей при виході на ринок стартап-проекту.

Таблиця 4.6 - Фактори загроз

№ п/п	Фактор	Зміст загрози	Можлива реакція компанії
1	Інфляція та зниження купівельної спроможності малого бізнесу	Через інфляцію споживачі змушені скорочувати витрати.	Забезпечується стабільна ціна без різких коливань через те, що отримується за рахунок переробки ПЕВЩ і не потребує додаткових капіталовкладень. Продукти мають довгий термін зберігання, що дозволяє закупити їх про запас, поки ціна вигідна.
2	Енергетичні проблеми	Бізнеси змушені платити значно більше за енергоносії, а також є перебої в електропостачанні.	Пропонуємо піролізну рідину як альтернативне технічне паливо, яке може замінити частково використання традиційного пального.

Продовження таблиці 4.6

3	Недовіра до нових технологій через відсутність масового впровадження	Потенційні покупці можуть остерігатися інноваційних підходів, бо не бачать прикладів масштабного успішного використання.	Показати результати лабораторних випробувань, провести демонстраційні пілоти або запропонувати пробну партію.
4	Низький контроль дотримання законодавства	Бізнес не відчуває реального стимулу здавати ПЕВЦ на переробку, дешевше просто викинути. Клієнт не мотивований платити за переробку.	Запропонувати ціну нижчу за вивіз на полігон і демонструвати переваги «зеленого» підходу через ESG-звіти. Розробити партнерські програми з торговими мережами, які добровільно беруть участь у роздільному зборі.
5	Наслідки війни	Через війну в багатьох регіонах пошкоджено інфраструктуру, що ускладнює логістику, знижує доступність якісних ресурсів, ускладнює стабільну роботу підприємств.	Виробництво в центральному або безпечному регіоні з доступною логістикою.

Описані фактори загроз серед яких є поточний політичний стан країни, а також людський фактор.

Наступна таблиця розкриває інформацію про фактори можливостей при виході на ринок стартап-проекту.

Таблиця 4.7 - Фактори можливостей

№ п/п	Фактор	Зміст зможливості	Можлива реакція компанії
1	Дешева сировина	Вартість пірокарбону, піролізного газу та піролізної рідини менша, тому що вона отримується з пластику, капіталовкладення мінімальні.	Акцентувати увагу на цьому, в рекламі звертати увагу на економічність и вигідність перед конкурентами.

Продовження таблиці 4.7

2	Підтримка українського бізнесу	Покупці дедалі частіше обирають продукцію українського походження	Підкреслювати, що матеріали українського виробництва, виготовлені з відходів, зібраних на території України.
3	Міжнародна співпраця	Все частіше компанії виходять на міжнародний ринок. В ЄС потрібно дотримуватися правил екологічного законодавства.	Продукти позиціонуються як частина «зеленої» економіки. Стартуп-проект відповідає ESG-стратегії, відповідає концепції циркулярної економіки. Походження продуктів відповідає принципам сталого розвитку.
4	Зростання екологічної відповідальності	Українці все активніше підтримують концепцію "нуль відходів", відновлюваної енергетики та свідомого споживання.	Розвиток соцмережі та впровадження маркетингу, орієнтований на екологічні цінності: акцентувати увагу на інноваційності та екологічності піролізної технології, отриманих продуктів таким способом.

Продовження таблиці 4.7

5	Технологія вирішує одразу дві задачі — переробка ПЕВЩ і створення цінного ресурсу	Покупець отримує продукт з "подвійною цінністю" — він походить із відходів і водночас зменшує екологічне навантаження на довкілля.	Робити акцент у маркетингу на «замкненому циклі», зниженні вуглецевого сліду, відповідності ESG-принципам.
---	---	--	--

Опис факторів можливостей робить акцент на екологічність.

Наступна таблиця описує конкурентне середовище для стартапу та оцінює привабливість ринку та стратегічні напрямки розвитку проекту.

Таблиця 4.8 - Ступеневий аналіз конкуренції на ринку

Особливості конкурентного середовища	В чому проявляється дана характеристика	Вплив на діяльність підприємства
1. Олігополія.	На ринку мало гравців, концепція нова й малопоширена.	Зміцнення позицій першопрохідця, формування стандартів і партнерських мереж.
2. Національний та міжнародний.	Основні конкуренти — українські компанії у сфері переробки відходів, можливо міжнародні.	Розширення діяльності по регіонах, можлива франшиза як на міжнародному ринку, так і в Україні
3. Внутрішньогалузева.	Конкуренція від інших підприємств, що переробляють пластмаси.	Постійне підвищення якості продукту, технологічне вдосконалення, нова сертифікація.
4. Товарно-родова.	Продукт конкурує з традиційним видами діяльності в цій сфері	Оптимізація ціни, підкреслення екологічних переваг і низької собівартості при заключенні контрактів на довгий строк.

Продовження таблиці 4.8

5. Нецінова.	Переваги формуються за рахунок екологічності, інноваційності та відповідності стандартам.	Акцент на екологічній чистоті продукту, демонстрація ефективності технології.
6. Марочна.	Розпізнавання продукції підприємства за фірмовим позначенням	Формування власного бренду технології та унікальних характеристик продукту.

За результатами ступеневого аналізу встановлено, що ринок характеризується обмеженою кількістю учасників та нецінковою конкуренцією, що створює сприятливі умови для закріплення позицій проєкту як першопрохідця та формування власних ринкових стандартів.

Наступна таблиця побудована за моделлю М. Портера, яка глибше досліджує конкуренцію у конкретній специфічній галузі.

Таблиця 4.9 - Дослідження конкуренції у галузі за М. Портером

	Прямі конкуренти в галузі	Потенційні конкуренти	Постачальники	Клієнти	Товари-замінники
Аналізові Складові	«Примапак» «Грін-Макс» Polygreen RDG Recycling FEEDNOVA	Компанії, що вже переробляють пластик іншими не традиційними методами та можуть розширити свою діяльність в майбутньому.	Постачальники ПЕВЦ відходів	Промислові підприємства, малий та середній бізнес.	Традиційні домінуючі методи поводження з відходами, інші альтернативні продукти/сировина

Продовження таблиці 4.9

Результат	Інтенсивність конкуренції: Середня. Невисока через малу кількість технологічно подібних компаній	Бар'єри для входу: Високі. Потрібні інвестиції, реклама, пізнаваність бренду. Строки виходу: 1-3 роки.	Постачальники диктують умови на ринку, адже компанії є прямими постачальниками ресурсів для компанії	Вимоги щодо ціни та стабільної якості продукту, а також вигоді обраного методу і перевага над традиційним поводженням з відходами	Недовіра до нового, невпізнаваність, звичка до традиційного методу поводження відходів.
-----------	--	--	--	---	---

За результатами аналізу конкурентного середовища можна зробити висновок, що проект має реальні можливості для виходу на ринок, оскільки інтенсивність конкуренції середня, а кількість технологічно схожих компаній обмежена.

На підставі результатів аналізу конкурентного середовища, а також з урахуванням особливостей ідеї проекту, очікувань і вимог споживачів до продукції та впливу факторів маркетингового середовища, формується та обґрунтовується сукупність ключових чинників конкурентоспроможності проекту.

Таблиця 4.10 - Обґрунтування факторів конкурентоспроможності

Фактор конкурентоспроможності	Обґрунтування (з точки зору клієнтів)
Екологічність	Для клієнтів екологічність продукту або послуги пов'язана з вимогами сталого розвитку, екологічного законодавства та принципам ESG. Підприємства дедалі частіше орієнтуються на рішення, що не створюють додаткового екологічного навантаження, сприяють зменшенню обсягів пластикових відходів та відповідають концепції циркулярної економіки. Вибір екологічно орієнтованого постачальника дозволяє компаніям покращувати власний імідж перед інвесторами та регуляторами.

Продовження таблиці 4.10

Низький вміст домішок	Низький рівень домішок у продуктах є ключовим критерієм для клієнтів, так як він визначає безпечність, стабільність і функціональність кінцевого продукту. Для рідких паливних фракцій це означає менший вміст шкідливих елементів, зниження корозійного зносу обладнання та стабільні характеристики під час згоряння. Для твердих вуглецевих матеріалів відсутність металів, пластифікаторів і некарбонізованих залишків є критичною для подальшого використання в якості палива. Клієнти обирають постачальників, які гарантують прогнозовану якість і мінімальні технологічні ризики.
Відповідність міжнародним стандартам	Для промислових споживачів відповідність міжнародним та галузевим стандартам є обов'язковою умовою співпраці, оскільки вона впливає на можливість інтеграції продукції у власні виробничі процеси та експорт. Постачальники, що працюють у межах визначених норм і стандартів, спрощують проходження екологічних аудитів, сертифікацій та перевірок. Крім того, прозорість процесів поводження з відходами є важливою складовою екологічної звітності клієнтів і зменшує регуляторні ризики.
Інноваційність	Сучасні технології зазвичай забезпечують вищу ефективність, стабільність якості та кращу керованість процесів. На ринку переробки полімерних відходів інноваційні підходи дозволяють отримувати продукти з прогнозованими властивостями та зменшувати побічні ефекти процесу. Клієнти схильні обирати постачальників, які застосовують сучасні технології, оскільки це знижує технологічні ризики та підвищує довіру до довгострокової співпраці.

Продовження таблиці 4.10

Вартість	Споживачі орієнтуються на мінімізацію сукупних витрат упродовж усього життєвого циклу продукту. Клієнти оцінюють не лише ціну, а й можливість зменшення витрат на логістику, імпорт, поводження з відходами та обслуговування обладнання. На цьому ринку важливим є баланс між ціною та якістю, а також економічна доцільність альтернативних методів поводження з ПЕВЩ у порівнянні зі спаленням або захороненням.
Доступність	Необхідність стабільних і безперебійних поставок. Локальне виробництво зменшує залежність від зовнішніх ринків, валютних коливань і логістичних ризиків. Також важливою є можливість оперативної доставки та тривалого зберігання продукції без втрати якості. Клієнти надають перевагу постачальникам, здатним забезпечити прогнозованість постачання та гнучкість у роботі з різними регіонами.

З урахуванням вищенаписанного можна сказати так: аналіз конкурентного середовища показує, що конкуренція переважно внутрішньогалузева та нецінова, зосереджена на інноваційності, екологічності та якості продуктів, а бар'єри для входу високі через технологічні та фінансові фактори. Для успішної діяльності проекту важливо підкреслювати екологічні переваги, дотримання міжнародних стандартів, стабільну якість продукції та впроваджувати прогресивні технології. Потенційні клієнти орієнтуються на надійність, вигоду та екологічність рішень, що формує ключові фактори конкурентоспроможності проекту. Таким чином, ринок є перспективним для входження, за умови правильного позиціонування та формування власного бренду продукту.

На наступному етапі передбачається виконання порівняльного аналізу (табл. 4.11), у межах якого буде здійснено оцінювання переваг і недоліків концепції стартап-проекту відносно ключових конкурентних рішень, представлених на ринку.

Таблиця 4.11 - Порівняльний аналіз сильних і слабких сторін PyroPlast

Energy

№ n/n	Фактор конкурентоспроможності	Рейтинг товарів-конкурентів у порівнянні з PyroPlast Energy						
		Рейтинг товарів-конкурентів у по- рівнянні з PyroPlast Energy						
		-3	-2	-1	0	+1	+2	+3
1	Екологічність		X Y Z	W				
2	Низький вміст домішок		Y Z	W X				
3	Відповідність міжнародним стандартам			W X		Y Z		
4	Інноваційність			X Z		Y W		
5	Економічність					Y Z	W X	
6	Доступність					X W	Z	Y

*Піролізний газ «Klean Industries» - W**Альтернативне паливо «Грін-Макс» - X**Переробка полімерів «RDG Recycling» - Y**Пірокарбон «Polvax-Ukraine» - Z*

Після проведення порівняльного аналізу слабкими місцями порівняно з конкурентами є економічність та доступність, а найсильнішими сторонами є екологічність, якість, інноваційність.

Завершальним етапом дослідження ринкових перспектив проєкту є формування SWOT-матриці, яка узагальнює визначені сильні та слабкі сторони технології, а також наявні ринкові можливості й загрози, що дозволяє всебічно оцінити потенціал впровадження проєкту з урахуванням ключових факторів впливу.

Таблиця 4.12 - SWOT- аналіз стартап-проєкту

СИЛЬНІ СТОРОНИ 1. Екологічність 2. Низький вміст домішок 3. Відповідність міжнародним стандартам 4. Інноваційність	СЛАБКІ СТОРОНИ 1. Економічність 2. Доступність
МОЖЛИВОСТІ 1. Дешева сировина 2. Вітчизняні продукти дешевше за імпорт 3. Міжнародна співпраця 4. Зростання екологічної відповідальності 5. Концентрація промислових підприємств в агломераціях 6. Тренд на екологічність 7. Зростання екологічної свідомості 8. Підтримка українського бізнесу 9. Технологія вирішує одразу дві задачі — переробка ПЕВЩ і створення цінного ресурсу	ЗАГРОЗИ 1. Інфляція та зниження купівельної спроможності малого бізнесу 2. Низький контроль дотримання законодавства 3. Наслідки війни 4. Енергетичні проблеми 5. Страх до всього нового у літніх людей 6. Нестача регламентів на альтернативні продукти 7. Недовіра до нових технологій через відсутність масового впровадження

Якщо проаналізувати таблицю SWOT-АНАЛІЗ, можна зробити висновок, що не дивлячись на довгий список представлених проблем, можливостей для стартапу більше. Сильних сторін виявилось в два рази більше, ніж слабких сторін. Можна зробити попередній висновок, що розроблений стартап-проект має всі шанси утриматися на ринку і в подальшому розвиватися у велику корпораційну компанію при сприятливих умовах і грамотній організації процесу.

На основі отриманих результатів внутрішніх характеристик технологій та зовнішніх факторів ринку, які можуть впливати на подальший розвиток, наступним етапом стане формування варіантів ринкових стратегій (табл. 4.13), що дозволить підготуватися до можливих ризиків і підвищити ефективність виходу технології на ринок.

Таблиця 4.13 - Альтернативи ринкового впровадження стартап-

проекту.

Альтернатива (орієнтовний комплекс заходів) ринкової поведінки	Ймовірність отримання ресурсів	Строки реалізації
1. Зменшення витрат за рахунок автоматизації процесів	Середня. Потрібні інвестиції	Довгострокові, 5-10 років
2. Розширення міжнародної співпраці	Середня.	Середньострокові 2–5 років
3.Заклучення довгострокових договорів між компаніями	Висока	Короткострокова, 1 рік

Зазначений альтернативний розвиток компанії є достатньо перспективним у майбутньому. В основному, запропоновані варіанти доволі довго будуть реалізовуватися, тому потрібно готуватися до їх можливої реалізації вже зараз.

4.4. Розроблення ринкової стратегії проекту

Початковим етапом формування ринкової стратегії є вибір підходу до охоплення ринку, що передбачає визначення та опис основних цільових груп потенційних споживачів.

Таблиця 4.14 - Формування цільових груп потенційних споживачів

№ п /п	Опис профілю цільової групи потенційних клієнтів	Готовність споживачів сприйняти продукт	Орієнтовний попит в межах цільової групи (сегменту)	Інтенсивність конкуренції в сегменті	Простота входу у сегмент
1	Промислові підприємства, які створюють великий об'єм пластику	Висока, через використання альтернативних технологій поводження з пластиком.	Середній, так як є традиційні методи поводження з пластиком.	Середня, на ринку є декілька компаній з дотичними послугами, але їх небагато	Середньо, є компанії-конкуренти.

Продовження таблиці 4.14

2	Підприємства, яким потрібна сировина	Середня, адже у підприємств вже є свої постачальники	Середній, так як небагато підприємств займається закупівлею сировини.	Низька, так як виробників сировини таким методом немає	Висока, додаткових витрат не передбачається
---	--------------------------------------	--	---	--	---

Оскільки проєкт орієнтується на кілька різних цільових груп — промислові підприємства, які створюють великий об'єм пластику та підприємства, яким потрібна сировина, доцільним є застосування стратегії диференційованого маркетингу. Такий підхід дозволяє знайти переваги продукту/послуги під кожен сегмент окремо, що підвищує ефективність виходу на ринок, ймовірність утриматися на ньому і конкурентоспроможність проєкту.

Для здійснення діяльності в визначених ринкових сегментах доцільно розробити та визначити базову стратегію подальшого розвитку.

Таблиця 4.15 - Визначення базової стратегії розвитку

Обрана альтернатива розвитку проєкту	Стратегія охоплення ринку	Ключові конкурентоспроможні позиції відповідно до обраної альтернативи	Базова стратегія розвитку
Розвиток проєкту лише як переробки ПЕВІЦ	Концентрований маркетинг	Зосередження тільки на наданні послуги. Можливість швидкого зростання, так як з трьома напрямками цей процес затягується.	Стратегія спеціалізації — фокус на тільки на наданні послуги, нарощування потужностей, оптимізація процесів, зміцнення репутації на ринку переробки

З урахуванням обраної альтернативи розвитку проєкту оптимальним

підходом є застосування стратегії диференціації.

Далі потрібно обрати стратегії конкурентної поведінки

Таблиця 4.16 - Визначення базової стратегії конкурентної поведінки

Обрана альтернатива розвитку проєкту	Стратегія охоплення ринку	Ключові конкурентоспроможні позиції відповідно до обраної альтернативи	Базова стратегія розвитку
Технологія каталітичного піролізу для переробки ПЕВЦ у пірокарбон, піролізний газ та піролізну рідину ще не має масового застосування в Україні. Проєкт може позиціонуватися як інноваційний.	Компанія орієнтується на обидва підходи: залучатиме нових клієнтів, які ще не працюють з подібними технологіями, і частково конкуруватиме за клієнтів, які наразі користуються традиційними методами поводження з ПЕВЦ.	Проєкт не копіює конкурентів. Він враховує базові функціональні потреби малого та середнього бізнесу в переробці ПЕВЦ.	Стратегія лідера — розширення первинного попиту. Через те що ринок переробки ПЕВЦ ще сформувався, компанія може стимулювати попит через демонстрацію ефективності технології та просуванні екологічних переваг

Стратегія розвитку була обрана як стратегія лідера, так як конкуренції в даній сфері помірна.

Після оформлення попередніх таблиць і врахування інформації з них, в наступній таблиці буде опис створення ринкової позиції та комплексу асоціацій, за якими споживачі зможуть розпізнавати торгову марку чи проєкт.

Таблиця 4.17 - Визначення стратегії позиціонування

Вимоги до товару цільової аудиторії	Базова стратегія розвитку	Ключові конкуренто-спроможні позиції власного стартап-проекту	Вибір асоціацій, які мають сформувати комплексну позицію власного проекту (три ключових)
Цільова аудиторія очікує екологічно безпечний, енергетично ефективний продукт із стабільними фізико-хімічними характеристиками, придатний для використання в процесах на промислових підприємствах за доступною ціною.	Проект орієнтується на стратегію інноваційного лідерства у сфері вторинної переробки полімерів із концентрацією на створенні замкненого виробничого циклу з високим ступенем доданої вартості.	Екологічність технології, локалізація сировини, низька собівартість, універсальність продукту та гнучкість у масштабуванні виробництва.	Екологічна відповідальність. Інноваційність. Енергетична ефективність.

З урахуванням вищезазначеної інформації можна зробити висновок, що проект має статус новатора на ринку, що дозволяє компанії формувати попит і займати лідерські позиції, орієнтуючись на залучення нових споживачів та створення конкурентних переваг через іноваційність і екологічність технології.

4.5. Розроблення маркетингової програми стартап-проекту

Наступним кроком є формування маркетингової програми стартап-проекту, для цього заповнюємо таблицю 4.18.

Таблиця 4.18 - Визначення ключових переваг концепції потенційного товару

№	Потреба	Вигода, яку пропонує товар	Ключові переваги перед конкурентами (існуючі або такі, що потрібно створити)
---	---------	----------------------------	--

Продовження таблиці 4.18

1.	У переробці ПЕВШ згідно європейських стандартів	Переробка сучасними методом каталітичного піролізу згідно стандартів ЄС	Надання повного циклу послуг: від збору та переробки до кінцевого виробництва. Інноваційні технології переробки відходів. Різноманітність бізнесу. Екологічність виробництва.
2	У дешевому матеріалі для опалення	Отримання товару за зниженою ціною для виготовлення активованого вугілля	Різноманітність бізнесу. Стійкість та зелені технології. Екологічність виробництва. Низький вміст домішок.
3	У дешевій альтернативі палива	Отримання палива за зниженою ціною для котлів, генераторів і тд.	Стійкість та зелені технології. Різноманітність бізнесу. Екологічність виробництва. Низький вміст домішок.
4	У використанні піролізного газу для процесів в промисловості	Отримання високоефективного сорбенту для очищення газів і повітря. Зниження окиснення та дефектів металу, покращення якості продукції. Створення бар'єрних, антистатичних, зносостійких покриттів.	Стійкість та зелені технології. Різноманітність бізнесу. Екологічність виробництва. Низький вміст домішок.

Ключовою конкурентною перевагою є поєднання відповідності європейським стандартам, низької собівартості кінцевих продуктів, багатоваріантності їх застосування та екологічності виробництва, що забезпечує широку привабливість пропозиції для різних галузей промисловості.

Далі створюється маркетингова модель продукту на трьох рівнях, яка передбачає деталізацію концепції товару або послуги та докладний опис.

Таблиця 4.19 - Опис трьох рівнів моделі товару

Рівні товару	Сутність та складові		
I. Товар за задумом	Піролізна рідина. Задовольняє потребу в альтернативному, дешевшому паливі. Допомагає зменшити залежність від традиційного пального. Пірокарбон. Задовольняє потребу в сировині для створення паливних брикетів, в подальшому використовувати для систем опалення. Послуга з переробки ПЕВЩ. Задовольняє потребу в правильному поводженні відходів ПЕВЩ, економії на захороненні та ековідповідальності Піролізний газ. Задовольняє потребу в сировині для виробництва нановуглецевих матеріалів, формування захисних газових атмосфер та газофазного нанесення покриттів.		
II. Товар у реальному виконанні	Властивості/характеристика	М/Нм	Вр/Тх /Тл/Е/Ор
	1. Енергоємна темна рідина, альтернативне паливо після стабілізації.	Матеріальне	темна рідина з теплотворною здатністю 18–32 МДж/кг, щільність ~1,1 г/см ³
	2. Високопористий вуглецевий, паливо для систем опалювання	Матеріальне	високопористий вуглецевий матеріал, питома площа поверхні до 800 м ² /г
	3. Повний цикл термічної обробки пластикових відходів, що зменшує їх обсяг, утворює корисні продукти та забезпечує клієнту екозвітність.	Нематеріальне	гнучкі тарифи, прозорий процес, повний цикл
	4. Легкий енергоємний газ, технологічна сировина для виробництва нановуглецевих матеріалів, формування захисних газових атмосфер та газофазного нанесення покриттів.	Матеріальне	теплота згоряння ~15–25 МДж/м ³ , легкий газ з високим вмістом Н ₂ , СО, СН ₄ .

Продовження таблиці 4.19

	Якість: підтвердження дослідами: низький вміст домішків, стандарти ЄС, відповідність закону «Про управління відходами», тестування, перевірка на фізико-хімічні показники
	Пакування в тарах, мішках та сталених бочках
	Марка: PyroPlast Energy+PiropalyvoPirocarbon
III. Товар із підкріпленням	1. До продажу: технічна документація, пробні партії Після продажу: інструкції з використання, консультації щодо застосування 2. До продажу: зразки на тестування Після продажу: супровід при запуску фільтрувальних систем, інструкції по утилізації 3. До продажу: безкоштовний аудит обсягів та логістики Після продажу: звіти, акти, консультації по екологічній звітності
За рахунок патенту, реєстрації торгової марки потенційний товар буде захищено від копіювання.	

Пропонований продукт поєднує матеріальні та нематеріальні характеристики, задовільняючи потреби в альтернативному паливі, сорбентах та послугах переробки ПЕВЩ, при цьому забезпечуючи екологічну безпеку та економічну вигоду для клієнтів. Його конкурентоспроможність підкріплюється технічною документацією, тестовими партіями, консультаціями після продажу та правовим захистом через патент і торгову марку.

Наступним етапом є окреслення допустимого діапазону цін для потенційного товару на основі аналізу вартості аналогів і товарів-замінників, а також платоспроможності цільових споживачів, тоді як остаточна ціна формується під час фінансово-економічного обґрунтування проєкту.

Таблиця 4.20 - Визначення меж встановлення ціни

№	Рівень цін на товари-замінники	Рівень цін на товари-аналоги	Рівень доходів цільової групи споживачів	Верхня та нижня межі встановлення ціни на товар/послугу
---	--------------------------------	------------------------------	--	---

Продовження таблиці 4.20

1.	Для послуги переробки: Звичайне захоронення або спалювання ПЕВЩ на полігоні коштує приблизно 2000–4000 грн/т	Вартість піролізної переробки ПЕВЩ у конкурентів становить від 5000 до 8000 грн/т	Малий та середній бізнес, ТОВ, мають бюджети, що дозволяють платити приблизно до 6000 грн/т,	Нижня межа: 5000 грн/т Верхня межа: 8000 грн/т
2	Для товару пірокарбон: Очікуваний ринковий діапазон для паливних брикетів на основі пірокарбону + тирси — орієнтовно 6000–8000 грн/т	Звичайні паливні брикети (6500–9500 грн/т) залежно від типу та якості.	Промислові котельні, малі й середні підприємства мають бюджети на закупівлю твердого палива до 10 000 грн/т	Нижня межа: 5 000 грн/т Верхня межа: 10 000 грн/т.
3	Для товару піролізна рідина: Дизпаливо або мазут — 35–50 грн/л	Біопаливо з ріпаку чи біоетанол — 30–45 грн/л	Підприємства, які використовують рідке паливо для спалювання/опалення/промислових процесів, готові платити до 35 грн/л.	Нижня межа: 25 грн/л Верхня межа: 40 грн/л
4.	Використання звичайних газів та технологічних сумішей (природний газ, CO, N ₂ , Ar) для промислових процесів, вартість 16–32 грн/м ³	Технічні гази (кисень, азот, аргон) у балонах від 190 до 3600 грн	Промислові підприємства матеріалознавчого, металургійного та енергетичного профілю; бюджети дозволяють платити до 40 грн/м ³	Нижня межа: 16 грн/м ³ Верхня межа: 37 грн/м ³

Запропоновані цінові діапазони дозволяють забезпечити баланс між привабливістю для клієнтів і рентабельністю проєкту, зберігаючи цінову гнучкість для роботи з різними сегментами ринку.

Наступним етапом є розробка ефективної системи збуту, яка передбачає рішення щодо самостійного продажу або залучення посередників його відповідного типу, визначення оптимальної структури каналів збуту.

Таблиця 4.21 - Формування системи збуту

Специфіка закупівельної поведінки цільових клієнтів	Функції збуту, які має виконувати постачальник товару	Глибина каналу збуту	Оптимальна система збуту
Цільові клієнти, а це промислові підприємства, орієнтуються на раціональність, надійність поставок і економічну доцільність. Вони зазвичай проводять тендери, надають перевагу довгостроковому партнерству. Рішення ухвалюються після оцінки продукту, перевірки сертифікатів, за участю фахівців.	Якісну логістику. Технічну підтримку. Гарантію та сертифікацію. Вигідне ціноутворення при великих обсягах або довгостроковому контракті.	Від виробника до кінцевого споживача. У разі піролізної рідини можливе залучення 1 дистриб'ютора, який має доступ до ринку котелень, промислових споживачів палива.	Прямі продажі великим підприємствам Онлайн-присутність (вебсайт, соц.мережі). Партнерські мережі (дистриб'ютори хімічної сировини енергосервісні компанії). Участь у виставках, форумах, тендерах

Аналіз закупівельної поведінки цільових клієнтів свідчить, що для них ключовими є економічна доцільність, надійність постачання, наявність

сертифікації та можливість довгострокової співпраці, що зумовлює раціональний і багатоступеневий процес ухвалення рішень.

Завершальним етапом маркетингової програми є створення концепції комунікацій, яка базується на обраному позиціонуванні та враховує особливості поведінки клієнтів.

Таблиця 4.22 - Концепція маркетингових комунікацій

Специфіка поведінки цільових клієнтів	Канали комунікацій, якими користуються цільові клієнти	Ключові позиції, обрані для позиціонування	Завдання рекламного повідомлення	Концепція рекламного звернення
Довго приймають рішення, бо аналізують ціни, технічні характеристики, довгострокові вигоди, часто хочуть побачити приклад або відгук з іншого підприємства, віддають перевагу надійним постачальникам, які забезпечують стабільну якість.	Онлайн-платформи та маркетплейси. Реклама в ЗМІ та соцмережах. Участь у міжнародних виставках та конференціях. Звіти, пізнавальний контент. Онлайн-консультації.	Екологічність Низький вміст домішок Відповідність міжнародним стандартам Інноваційність	Основна концепція: ми переробляємо ПЕВЩ безпечно, з мінімальними витратами. З відходів клієнт може отримати корисні продукти паливо, сировина для виробництва нановуглецевих матеріалів, формування захисних газових атмосфер та газофазного нанесення покриттів. Ми допомагаємо зекономити і при цьому не шкодити природі	Ми фокусуємось на вигоді, екології та простоті співпраці, показуючи, що наші рішення це сучасно, вигідно і вже працює в Україні.

Концепція маркетингових комунікацій орієнтована на раціональну модель прийняття рішень цільовими клієнтами, які потребують підтвердження технічної надійності, економічної доцільності та екологічної безпечності запропонованих рішень. Обрані канали та позиціонування забезпечують формування довіри до проекту через акцент на інноваційності, відповідності міжнародним стандартам і практичній вигоді переробки ПЕВЩ з отриманням корисних продуктів без негативного впливу на довкілля.

4.6. Висновок до Розділу 4.

Стартап-проект RuгоPlast Energy має потенціал для ринкової комерціалізації завдяки наявності попиту на альтернативне паливо, сировину та послуги переробки ПЕВЩ. Динаміка ринку свідчить про поступове збільшення потреби в екологічних продуктах і рішеннях, що забезпечує рентабельність діяльності.

Потенційні клієнти, а саме промислові підприємства, малий та середній бізнес, зацікавлені у надійних і економічно вигідних рішеннях. Хоча конкуренція серед компаній, що переробляють пластик, середня, бар'єри входу високі, що, в свою чергу, захищає проект від швидкого проникнення нових учасників. Високий рівень технічних та фінансових вимог до входу на ринок забезпечує стабільність позицій для стартап-проекту. Конкурентоспроможність проекту підсилюється інноваційними технологіями піролізу, екологічністю, повним циклом обслуговування та різноманіттям продуктів. Наявність відносно обмеженої кількості технологічно подібних компаній дає перевагу у формуванні ринкової ніші. Для впровадження доцільно обрати пряму систему збуту великим підприємствам із залученням онлайн-платформ та партнерських мереж. Врахування специфіки закупівельної поведінки клієнтів дозволяє оптимізувати логістику, ціноутворення та технічну підтримку.

Використання маркетингових комунікацій через виставки, форуми та інформаційний контент сприятиме формуванню довіри до бренду та підвищенню впізнаваності. Орієнтація йде на екологічність, стандарти ЄС, а низький вміст домішок у продукції підвищує її привабливість для клієнтів.

Для альтернативної ринкової реалізації проекту доцільно обрати варіант прямого надання послуги з переробки ПЕВЩ для промислових підприємств.

Загалом, проект має всі передумови для успішної реалізації на ринку, а його подальша імплементація є доцільною.

ВИСНОВКИ

В даній роботі було проведено комплексне вивчення процесів звичайного та швидкого піролізу поліетилену високої щільності та впливу різних каталізаторів на вихід продуктів, газовий склад та перебіг реакцій термічної деструкції. На основі виконаних досліджень, а згодом і матеріального балансу та хроматографічного аналізу сформульовано такі висновки:

Проведено аналіз науково-технічних джерел щодо сучасних методів переробки полімерних відходів. Узагальнення літературних даних показало, що в сучасних дослідженнях приділяється особлива увага каталітичному піролізу, який дозволяє керувати складом продуктів, знижувати енергозатрати процесу та є екологічним методом в порівнянні з традиційними методами поводження з пластиком.

Проведено порівняльний аналіз двох режимів переробки поліетилену високої щільності - звичайного та швидкого піролізу. Перший забезпечує значно вищий вихід рідкої фракції та збільшену частку легких вуглеводнів. Другий навпаки забезпечує більш рівномірне розкладання полімеру, характеризується вищим вмістом твердого залишку та обмеженим виходом легких вуглеводнів.

Встановлено вплив каталізаторів на глибину протікання процесу піролізу. Експериментальні результати показали, що додавання каталізаторів до процесу піролізу суттєво впливає на співвідношення рідкої, газової та твердої фаз. Найменший вихід рідкої фракції спостерігався за використанням НУ - 10,53 г, тоді як максимальний вихід був в реакції з Аскаритом - 36,00 г та Ni/CaO - 34,09 г.

Отримані та проаналізовані хроматограми за допомогою газового хроматографу Agilent Technologies 7890A. Зібрані дані оброблялися і були представлені за допомогою програмного забезпечення Agilent OpenLab.

Здійснено оцінку комерційних перспектив стартап-проекту запропонованої технології каталітичного піролізу та його кінцевими продуктами - піролізною рідиною, пролізним газом та пірокарбоном. При проведенні аналізу ринку проект є

конкурентоспроможним і має високий потенціал економічної ефективності.

ЛІТЕРАТУРА

1. Md. Golam Kibria, Nahid Imtiaz Masuk, Rafat Safayet, Huy Quoc Nguyen, Monjur Mourshed, Plastic Waste: Challenges and Opportunities to Mitigate Pollution and Effective Management //, International Journal of Environmental Research, 20 January 2023.
2. Б. В. Коріненко, О. С. Худоярова, М. В. Хутько, А. П. Ранський. Особливості термодеструкції вторинної полімерної сировини // Вісник Вінницького політехнічного інституту (1). – 2021. с 29-36.
3. Wenyu Wu Klingler, Lucie Perret, Patrick Rupper, Sandro Lehner, a Xiaoyu Zhou, Henrik Eliasson, Rico Muff, Manfred Heuberger and Sabyasachi Gaan. A facile methodology for side- and upcycling of HDPE waste via partial creation of unsaturated double bonds // Green Chemistry, 21 October 2024, Volume 26 (20), pp. 10353-10622.
4. О. В. Суберляр, і П. І. Баштанник, Технологія переробки полімерних та композиційних матеріалів // Київ, Україна, 2006, 270 с.
5. S.M. Al-Salem. Thermal pyrolysis of high density polyethylene (HDPE) in a novel fixed bed reactor system for the production of high value gasoline range hydrocarbons (HC) //, Process Safety and Environmental Protection, July 2019, Volume 127, P. 171-179.
6. Shahina Riaz, Nabeel Ahmad, Wasif Farooq, Imtiaz Ali, Mohd Sajid, Muhammad Naseem Akhtar. Catalytic Pyrolysis of Hdpe for Enhanced Hydrocarbon Yield: A Boosted Regression Tree Assisted Kinetics Study for Effective Recycling of Waste Plastic // 25 Jun 2024.
7. Каток К. В., Тьортих В. А., Павленко А. М., Бричка С. Я., Приходько Г. П. Піролітичний синтез вуглецевих наноструктур на Ni, Co / МСМ-41 каталізаторах // Магістеріум. Природничі науки. – 2004. Вип. 16.
8. Деркач Ф. А. Хімія // Львів : Львівський університет, 1968. — 312 с.
9. Nisha Singh & Tony R. Walker. Plastic recycling: A panacea or environmental pollution problem // npj Materials Sustainability, 01 August 2024, volume 2 (17)

10. Lu Yao, Jianhua Zhu, Shuyuan Li, Yue Ma & Changtao Yue. Analysis of liquid products and mechanism of thermal/catalytic pyrolysis of HDPE //, Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, 11 November 2022.
11. Sittichai Natesakhawat, Jennifer Weidman, Stephanie Garcia, Nicholas C. Means, Ping Wang. Pyrolysis of high-density polyethylene: Degradation behaviors, kinetics, and product characteristics // Journal of the Energy Institute, 5 July 2024, Volume 116.
12. Enggar Hero Istoto, Widayat and Singgih Saptadi. Production of Fuels From HDPE and LDPE Plastic Waste via Pyrolysis Methods // E3S Web Conf., 2019, Volume 125 (14011), Section Renewable Energy.
13. N F A Ghaffar, A Johari, T A T Abdullah and A Ripin. Catalytic Cracking of High Density Polyethylene Pyrolysis Vapor over Zeolite ZSM-5 towards Production of Diesel// IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 8th Conference on Emerging Energy & Process Technology 2019 (CONCEPT 2019), November 2019, Volume 808, pp. 27-28.
14. Jesse Sarpong-Mensah. Pyrolysis of High-Density Polyethylene (HDPE) Plastic Waste to Liquid Fuel // MSc Advanced Chemical Engineering, 2023, p. 49.
15. Kyrylo Shevchenko, Andrii Hryhorov. Features of receiving the gasoline fraction by thermal pyrolysis of polyolefin raw materials // Bulletin of the National Technical University KhPI Series Chemistry Chemical Technology and Ecology, May 2024.
16. Shushay Hagos Gebre. Recent Trends in the Pyrolysis of Non-Degradable Waste Plastics / Shushay Hagos Gebre, Marshet Getaye Sendeku, Mohamed Bahri // Chemistry Open. -2021. -Volume 10, 1202-1226.
17. Enggar Hi, Widayat Widayat, Singgih Saptadi. Production of Fuels From HDPE and LDPE Plastic Waste via Pyrolysis Methods//January 2019, E3S Web of Conferences 125(1):14011
18. Mueanmas, C. Liquid Fuel Production from Polyethylene Plastic Waste by Pyrolysis Process / Mueanmas, C., Nikhom, R. // Rajamangala University of Technology Srivijaya Research Journal. -2022. -Volume 14(2), 405-417.

19. Supriyanto. Gaseous products from primary reactions of fast plastic pyrolysis /Supriyanto, Paivi Ylittero, Tobias Richards // Journal of Analytical and Applied Pyrolysis. -2021. -Volume 158. -105248.
20. Yansaneh, O.Y.; Zein, S.H. Recent Advances on Waste Plastic Thermal Pyrolysis: A Critical Overview // Processes , February 2022,10, 332. P 25.
21. Zaira Zaman Chowdhury, Kaushik Pal, Wageeh Yehye, Suresh Sagadevan, Syed Tawab Shah, Abimbola Adebisi, Emy Marliana, Rahman Faizur Rafique, Rafie Bin Johan. Pyrolysis: A Sustainable Way to Generate Energy from Waste //Intech, July 2017, p 36.
22. Dyvonne Muchenje, Imran Molvi, Sumit Das Lala. A review on transforming waste plastic into pyrolysis oil // Conference: THE PARUL UNIVERSITY INTERNATIONAL CONFERENCE ON ENGINEERING & TECHNOLOGY: PICET2024, January 2025
23. Khaled Ramzy, Tamer Ismail, Mohammed Alswat, W.A. El-Askary. Effect of using zeolite as a catalyst on syngas produced from different wastes using pyrolysis technology // Thermal Science and Engineering Progress 65:103904, September 2025
26. Bhawna Yadav Lamba. A Review on Current Technologies for Plastic Waste Treatment with Focus on Pyrolysis for Energy Recovery // Journal of Analytical and Applied Pyrolysis 192:107301, July 2025
27. Zahir Barahmand, Liang Wang, Jens Bo Holm-Nielsen, Marianne Eikeland. Significance of pyrolysis in the circular economy: An integrative review of technologies, potential chemicals, and separation techniques //Fuel 398:135539, May 2025.
28. Hemant Kumar, Rahul Goyal. A Review on Comparative Study of Mixed Waste Plastic Pyrolytic Fuels in IC Engine //Proceedings of the 10th International Conference on Mechanical, Automotive and Materials Engineering (pp.39-49), September 2024.
29. Merve Sogancioglu, E. Yel, Gulnare Ahmetli. Pyrolysis of waste high density polyethylene (HDPE) and low density polyethylene (LDPE) plastics and production of epoxy composites with their pyrolysis chars // Journal of Cleaner Production 165, July 2017.

30. Shafferina Dayana, Faisal Abnisa, Wan Mohd Ashri Wan Daud, Mohamed Kheireddine Aroua, King Fahd. Petroleum and Minerals 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, September 2017.
31. Débora Almeida, Maria de Fátima Marques. Thermal and catalytic pyrolysis of plastic waste. // *Polímeros* 26(ahead), February 2016.
32. Rashid Miandad, Mohamed Barakat, Mohammad Rehan, Asad Aburizaiza, Iqbal Ismail, Dr. Abdul-Sattar Nizami. Plastic waste to liquid oil through catalytic pyrolysis using natural and synthetic zeolite catalysts // *Waste Management* 69(1):66–78, September 2017.
33. Yehya Jaafar, Lokmane Abdelouahed, Roland Antoine El hage, Antoine El Samrani, Bechara Taouk. Pyrolysis of common plastics and their mixtures to produce valuable petroleum-like products // *Polymer Degradation and Stability* 195(1526):109770, November 2021.
34. Manigandan Sekar, Vinoth Kumar Ponnusamy, Arivalagan Pugazhendhi, Sandro Nižetić, T.R Praveenkumar. Production and utilization of pyrolysis oil from solidplastic wastes: A review on pyrolysis process and influence of reactors design // *Journal of Environmental Management* 302(20):114046, January 2022.
35. Hans-Kristian Norum Eidesen, Hassan Khawaja, Steve R Jackson. Simulation of the HDPE Pyrolysis Process // *The International Journal of Multiphysics*, March 2018, 12(1):79.
36. Fadillah, G.; Fatimah, I.; Sahroni, I.; Musawwa, M.M.; Mahlia, T.M.I.; Muraza, O. Recent Progress in Low-Cost Catalysts for Pyrolysis of Plastic Waste to Fuels. *Catalysts*, July 2021, 11, 837.
37. Wilson Uzochukwu, Reginald Umunakwe, Henry Chinedu Obasi, Michael Ifeanyichukwu Ugbaja, Chinedu Cosmas, Uche, Wilson Uzochukwu Eze, Chinedu Henry, Innocent Chimezie Madufor. Plastics waste management: A review of pyrolysis technology // *Journal of the Energy Institute*, July 2021, 1(1):50-69.

38. Oyetunji O. Oyeleke, Olayinka S. Ohunakin, Damola S. Adelekan. Catalytic Pyrolysis in Waste to Energy Recovery Applications: A Review // IOP Conference Series Materials Science and Engineering, April 2021 1107(1):012226.

39. Joo-Sik Kim. Research papers : pyrolysis of plastic wastes using the non-catalytic hamburg-process and a catalytic process using the cycled-spheres-reactor // Environmental Engineering Research, February 2004 9(1).

40. Tu Xayachak, Nawshad Haque, Rajarathinam Parthasarathy, Sarah King, Nargessadat Emami, Deborah Lau, Biplob Pramanik. Pyrolysis for plastic waste management: An engineering perspective // Journal of Environmental Chemical Engineering, December 2022, 10(6):108865.

41. Haseeb Yaqoob, Ee Sann Tan, Hafiz Ali, Hwai Chyuan Ong, Muhammad Ahmad, Muhammad Umer Farooq. Sustainable Energy Generation from Plastic Waste: An In-depth Review of Diesel Engine Application // Environmental Technology & Innovation, December 2023, 34(1):103467.

42. Zahidul Islam, Mohammad Rasul, M.I. Jahirul, Mohammad Mehedi Hasan. Properties of pyrolysis oils derived from different organic wastes for assessing their suitability for engine fuel // Energy Conversion and Management X, January 2025 25:100875

43.Маркетинг стартап-проектів : навчальний посібник для усіх спеціальностей другого освітнього ступеню «магістр» / С. О. Солнцев, О. В. Зозульов, Н. В. Юдіна, Т. О. Царьова, Н. В. Язвінська ; за заг. ред. С.О. Солнцева ; КПІ ім. Ігоря Сікорського. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2019. – 218 с. URL : <http://ela.kpi.ua/handle/123456789/27437>

44. Розроблення стартап-проекту : Методичні рекомендації до виконання розділу магістерських дисертацій для студентів інженерних спеціальностей / За заг. ред. О.А. Гавриша. Київ : НТУУ «КПІ», 2016. 28 с.

45. Semeniuk, S., Levytskyi, V., Fomina, O., Fedorchenko, K., Yudina, N., Ratynskiy, V., Shcherbatiuk, O., Bendiuh, V., & Zhurakivska, Y. (2024). Overcoming barriers to digitalization of small and medium-sized enterprises under martial law. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 3(13 (129), 57–69.

<https://doi.org/10.15587/1729-4061.2024.304997>

<https://journals.uran.ua/eejet/article/view/304997> .

46. Yudina N. V. Methods of the Startup-Project Developing Based on ‘the Four-Dimensional Thinking’ in Information Society // Marketing and Management of innovations. 3’2017, P. 245-256. DOI:10.21272/mmi.2017.3-23 <http://mmi.fem.sumdu.edu.ua/journals/2017/3/245-256>.

47. Yudina, N. Economic “Butterfly” and Futurology of the War in Ukraine. Economic Bulletin Of National Technical University Of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute". Kyiv: Management And Marketing Faculty Of National Technical University Of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”, 2022. №23 (2022). PP. 77-82. DOI: <https://doi.org/10.20535/2307-5651.23.2022.264637>.

48. Yudina, N. Algorythm Of Marketing Decision Making. Economic Bulletin Of National Technical University Of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute". Kyiv: Management And Marketing Faculty Of National Technical University Of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”, 2022. №22 (2022). PP. 1-9. DOI: <https://doi.org/10.20535/2307-5651.22.2022.260163>.

49. Yudina, N. Future Study Implementation Into Marketing Activity Of Companies. Economic Bulletin Of National Technical University Of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute". Kyiv: Management And Marketing Faculty Of National Technical University Of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”, 2021. №19 (2021). PP. 1-9 URL : <http://ev.fmm.kpi.ua/article/view/240315>.

50. Yudina, N., Pidlisna, O. Marketing Perception Of Technological Uncertainty By Decision-Makers. Economic Bulletin Of National Technical University Of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute". Kyiv: Management And Marketing Faculty Of National Technical University Of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”, 2021. №18 (2021). PP. 1-10. DOI: <https://doi.org/10.20535/2307-5651.18.2021.238105>.

51. Yudina, N., Instrumenty Zarządzania Przyszłością. Marketing Instytucji Naukowych I Badawczych, Vol. 38, Issue 4,, 2020, Sieci Badawczej Łukasiewicz – Instytutu Lotnictwa. Poland, Warszawa, p. 1-19 ISSN 2353-8503 eISSN 2353-8414.

http://minib.pl/wp-content/uploads/2020/12/4-Yudina_pl.pdf. DOI: 10.2478/minib-2020-0027.

52.Yudina, N. Business Forecasting of Marketing Activity Riskiness of Companies in Markets. Economic Bulletin of National Technical University of Ukraine "Kyiv Polytechnic Institute". №17(2020). P. 372-383. URL : <http://ev.fmm.kpi.ua/article/view/216380/>

ДОДАТОК А

НАУКОВІ ПУБЛІКАЦІЇ ЗДОБУВАЧА



Матеріали
XXV Міжнародної науково-практичної конференції
"Екологія. Людина. Суспільство"
пам'яті д-ра Дмитра СТЕФАНІШИНА
(12 червня 2025 р., м. Київ, Україна)

Proceedings
of the 25th International Scientific and Practical Conference
"Ecology. Human. Society"
dedicated to the memory of Dr. Dmytro STEFANYSHYN
(June 12, 2025, Kyiv, Ukraine)



Ольга ЗАБНЄВА, Дмитро ПІНЧУК, Сергій СМОЛІН, Ольга ШВИДЕНКО ДОСЛІДЖЕННЯ УМОВ ОТРИМАННЯ КАРБОНІЗОВАНОГО МАТЕРІАЛУ ІЗ БІОВІДНОВЛЮВАЛЬНОЇ СИРОВИНИ.....	172
Олена ІВАНЕНКО, Богдан КОРІНЕНКО, Ігор БИЧКО, Кароліна ВОЙТЕНКО, Артем МАРТИНЮК КАТАЛІТИЧНИЙ ШВИДКИЙ ПРОЛІЗ ВІДХОДІВ ПОЛІМЕРНИХ МАТЕРІАЛІВ.....	175
Софія ІГНАТЕНКО, Інна ГУТАК, Оксана ПАВЛЕНКО ВИКОРИСТАННЯ ПОРТАТИВНИХ ФІЛЬТРІВ ДЛЯ ОЧИЩЕННЯ ПИТНОЇ ВОДИ НА ПРИКЛАДІ КРИНИЧНОЇ ВОДИ ШОСТКИНСЬКОЇ ГРОМАДИ.....	181
Гвідас ЙОКУБАУСКАС, Егідіюс ГРІШКОНІС, Ремігіюс ІВАНАУСКАС, Гінтарас ДЕНАФАС ГІДРОМЕТАЛУРГІЙНЕ ВИДОБУВАННЯ МЕТАЛІВ З ДРУКОВАНИХ ПЛАТ.....	187
Ростислав КАРПЕНКО, Микола ГОМЕЛЯ ЗАГАЛЬНА ОЦІНКА ВПЛИВУ ЕКСПЛУАТАЦІЙНИХ ПАРАМЕТРІВ НА ЕФЕКТИВНІСТЬ СИСТЕМ ЗВОРОТНОГО ОСМОСУ.....	192
Василь КОРБУТЯК, Ігор СТАТНИК, Віктар ФЯНЧУК, Ярослав ХОДНЕВИЧ, Даніель БЕНАТОВ, Анатолій ЛІЩИНСЬКИЙ ВПЛИВ МЕРЕЖІ КАНАЛІВ НА ФОРМУВАННЯ ПОВЕРХНЕВОГО СТОКУ БОЛОТНОГО МАСИВУ СОМИНЕ В КОНТЕКСТІ ВІДНОВЛЕННЯ ЙОГО ГІДРОЛОГІЧНОГО РЕЖИМУ.....	196
Дмитро КОРОБІЙ, Олександр ХОХОТОВА ПОШУК НОВИХ ЕКОНОМІЧНО ДОСТУПНИХ СОРБЕНТІВ ДЛЯ ЗАХИСТУ ВОДОЙМ ВІД ЗАБРУДНЕНЬ.....	203
Микола КОСМИНА, Юлія НОСАЧОВА ПОРІВНЯННЯ ВПЛИВУ ІОНІВ ЗАЛІЗА І МІДІ НА ПРОЦЕСИ ЗНЕКИСНЕННЯ ВОДИ ПРИ ТЕМПЕРАТУРІ 20 °С З ВИКОРИСТАННЯМ ГІДРАЗИНУ.....	207
Євгеній КОСТЕНКО, Тетяна ОБУШЕНКО, Аркадій ШАХНОВСЬКИЙ, Наталія ТОЛСТОПАЛОВА, Ольга САНГІНОВА, Олександр БОЛЄЛІЙ ВПЛИВ СТОРОННІХ ІОНІВ НА ЕФЕКТИВНІСТЬ ДЕФТОРУВАННЯ НА ФЕРУМВМІСНИХ АДСОРБЕНТАХ.....	212
Євгеній КОСТЕНКО, Аркадій ШАХНОВСЬКИЙ, Тетяна ОБУШЕНКО, Наталія ТОЛСТОПАЛОВА, Ольга САНГІНОВА, Олександр ГРУШЕВСЬКИЙ ДЕЯКІ ПИТАННЯ КОМП'ЮТЕРНОГО МОДЕЛЮВАННЯ ТА ОПТИМІЗАЦІЇ ПРОЦЕСІВ СОРБЦІЙНОГО ОЧИЩЕННЯ ВОДИ ВІД СПОЛУК ФТОРУ.....	218
Андрейс КРАУКЛІС МАТЕМАТИЧНІ МЕТОДИ МОДУЛЬНОГО МОДЕЛЮВАННЯ ДЛЯ ІМІТАЦІЇ ВЗАЄМОДІЇ МАТЕРІАЛІВ ІЗ ДОВКІЛЛЯМ.....	224
Яна КРИЖАНОВСЬКА, Микола ГОМЕЛЯ, Дарина ДУДКА ОТРИМАННЯ СПОЛУК ОКИСЛЕНОГО ХЛОРУ ІЗ РОЗЧИНІВ ХЛОРИДУ НАТРІЮ ЕЛЕКТРОДІАЛІЗОМ.....	230
Ольга ЛЕГОТІНА, В'ячеслав ГНАТЮК АНАЛІЗ ДИНАМІКИ АТМОСФЕРНОГО ЗАБРУДНЕННЯ У МІСТІ КИСВІ В УМОВАХ ВОЄННОГО СТАНУ (2023 РІК).....	234
Григорій ЛІЗАК, Данііл ДРАГАН, Валерій БАРБАШ ТЕХНОЛОГІЇ ОДЕРЖАННЯ ІЗ СТЕБЕЛ АМАРАНТУ НАНОЦЕЛЮЛОЗИ ТА ЇЇ ВИКОРИСТАННЯ У ВИРОБНИЦТВІ ПАПЕРУ І КАРТОНУ.....	238



Матеріали XXV Міжнародної науково-практичної конференції
«Екологія. Людина. Суспільство»
пам'яті д-ра Дмитра СТЕФАНІШИНА
(12 червня 2025 р., м. Київ, Україна)

Proceedings of the XXV International Science Conference
«Ecology. Human. Society»
dedicated to the memory of Dr. Dmytro STEFANYSHYN
(June 12 2025, Kyiv, Ukraine)

ISSN (Online) 2710-3315

<https://doi.org/10.20535/EHS2710-3315.2025.330388>

КАТАЛІТИЧНИЙ ШВИДКИЙ ПІРОЛІЗ ВІДХОДІВ ПОЛІМЕРНИХ МАТЕРІАЛІВ

Олена ІВАНЕНКО¹, Богдан КОРІНЕНКО², Ігор БИЧКО³,
Кароліна ВОЙТЕНКО¹, Артем МАРТИНЮК¹

¹Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського
Берестейський проспект, 37, Київ, 03056, Україна

²Інститут біоорганічної хімії та нафтохімії ім. В. П. Кухаря НАН України
вулиця Академіка Кухаря, 1, Київ, 02000, Україна

³Інститут фізичної хімії ім. Л. В. Писаржевського
проспект Науки, 31, Київ, 03028, Україна
e-mail: korzhenevskayakarolina@gmail.com

Анотація

Показана та обґрунтована доцільність переробки полімерних відходів, зокрема поліетилену високої щільності (ПЕВЩ), методом каталітичного піролізу з метою отримання альтернативних джерел енергії: синтез-нафти, піролізних газів та пірокарбону. Досліджена термодеструкція відходів ПЕВЩ на установці періодичної дії за відсутності кисню повітря із застосуванням каталізаторів (Ni/MgO, Fe₂O₃, Ni/CaO, Fe₃O₄, H₂, аскарит) та без них. Встановлено, що проведення каталітичного піролізу в температурному діапазоні 450 °C сприяє підвищенню виходу рідких вуглеводнів, зокрема синтез-нафти, а також покращенню якості складу отриманих фракцій. Визначено, що застосування каталізаторів сприяє зменшенню вмісту твердого залишку та підвищенню виходу газової суміші.

Ключові слова: поліетилен високої щільності, піроліз, каталізатори, піролізна рідина, пірокарбон.

ПЕВЩ є хімічно інертним матеріалом, що забезпечує його тривалий термін експлуатації, але водночас створює серйозну проблему, коли мова йде про його переробку. Він майже не піддається біологічному розкладу. У природних умовах його деградація може тривати від 100 до 500 років, залежно від умов середовища (температура, вологість, вплив ультрафіолету). Це означає, що більшість виробів з ПЕВЩ, які були вироблені десятки років тому, все ще перебувають на сміттєзвалищах або в океані.

Каталітичний піроліз є вдосконалим підходом, який передбачає використання каталізаторів для зниження температури процесу, підвищення виходу рідких вуглеводнів і покращення якості кінцевих продуктів. Вплив каталізаторів на механізм розкладу ПЕВЩ має вирішальне значення, оскільки дозволяє контролювати розподіл отриманих фракцій та мінімізувати утворення небажаних побічних речовин [1].

Піроліз поліетилену високої щільності (ПЕВЩ) може відбуватися у двох основних режимах: звичайному (повільному) та швидкому. Основна різниця між ними полягає в швидкості нагріву, температурному режимі, виході продуктів та їх складі.

Звичайний піроліз, що відбувається при температурі 600-800 °С, здатен скоротити час реакції, але кінцевими продуктами його проведення є газоподібні речовини та більш легкі вуглеводні, при цьому вихід газу зростає з підвищенням температури. Порівняно низькотемпературний піроліз при температурі 400-500 °С, при якому витрачається менше енергії, забезпечує переважно маслянистий матеріал в якості кінцевого продукту проведення процесу (рис. 1).

При термічному розкладанні полімерів одночасно протікають два типи реакцій. Перша є випадковим розривом хімічних зв'язків, що призводить до зміни молекулярної маси і відновлення структури полімеру.

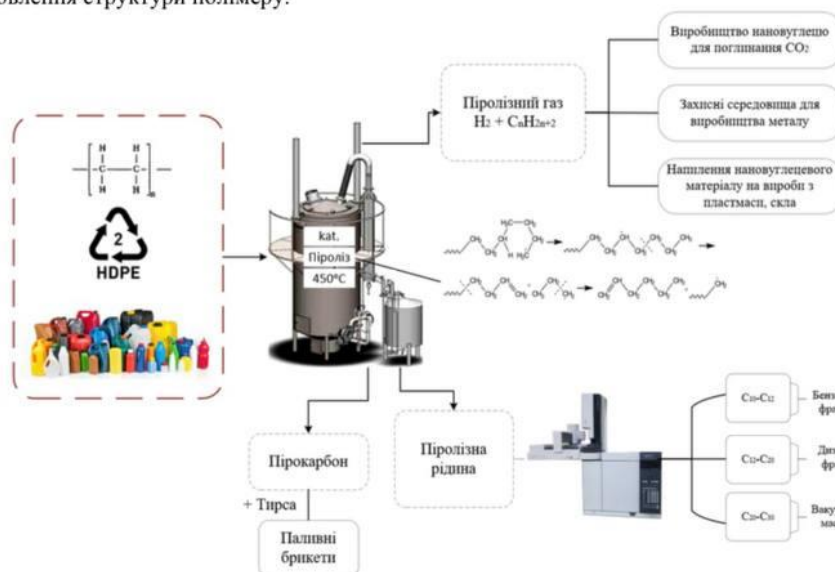


Рис.1. Переробка і подальше використання продуктів переробки поліетилену високої щільності

Друга реакція пов'язана з розривом подвійних вуглецевих зв'язків, що призводить до утворення летких сполук. Аналіз складу та продуктів піролізу дозволяє зрозуміти механізми термічного розпаду полімерів.

Розкладання полімерів може відбуватися двома шляхами: механізм розриву ланцюга на кінцях молекули або випадкового розпаду всередині полімерної структури. У разі розкладання на кінцях ланцюга відбувається послідовне вивільнення мономерних ланок, що також називають деполімеризацією. Цей процес протікає за вільнорадикальним механізмом і є зворотним етапом полімеризації.

За такого типу розкладання молекулярна маса полімеру поступово зменшується, а основним продуктом реакції є мономери. Даний механізм можливий, якщо основні зв'язки у

полімері слабші, ніж зв'язки бічних груп. Він спостерігається тільки у полімерних молекул, що мають активні кінцеві групи, такі як вільні радикали, катіони або аніони.

Швидкий піроліз представляє собою термічний розклад органічних сполук за відсутності кисню, що відбувається при температурах 400–600 °С за доволі короткий проміжок часу. При цьому процесі полімерні ланцюги розпадаються, утворюючи газоподібні (H_2 , CO , CO_2 , CH_4 , C_2H_6 тощо), рідкі продукти (піролізне масло) і тверді залишки, серед яких знаходиться пірокарбон, який складається з елементарного вуглецю та мінеральних домішок (рис. 1).

Особливістю процесу є формування пірокарбону – твердої вуглецевої речовини, яка утворюється внаслідок неповного розкладу органічних полімерів та подальшої полімеризації вуглецевих радикалів. Каталізатори (Ni/MgO , Ni/CaO , Fe_3O_4 , Fe_2O_3 , Аскарит, HY) відіграють важливу роль у регулюванні процесу розкладу та сприяють прискоренню реакцій утворення пірокарбону. Каталізатор – це речовина, яка вступає в хімічну реакцію та виходить з неї без змін, збільшуючи ймовірність цієї реакції. Каталізатор утворює нестабільний комплекс з реагентами, який на наступному етапі розпадається на необхідні продукти та каталізатор. Енергія активації цих процесів нижча, ніж енергія активації некаталітичних реакцій. Зниження енергії активації дозволяє проводити реакції в більш м'яких умовах, наприклад, при більш низьких температурах або при нормальному (атмосферному) тиску. Каталіз не зміщує рівноваги реакції, а лише прискорює її встановлення [2, 3].

Найефективніший каталізатор Аскарит, який завдяки найвищій температурі реактора забезпечує високий вихід рідини та високу стабільність. Найменш ефективний каталізатор є ПЕВЩ + HY через помірні температури та стабільність, що призводять до середнього виходу рідини, а також при відсутності використання каталізаторів процес відбувається повільно і неефективно, рекомендується використовувати каталізатори при виборі методу термічного розщеплення ПЕВЩ, а саме високотемпературному піролізі. ПЕВЩ + Fe_2O_3 , ПЕВЩ + Ni/CaO та ПЕВЩ + Ni/MgO демонструють високий вихід рідини (рис. 2, 3).

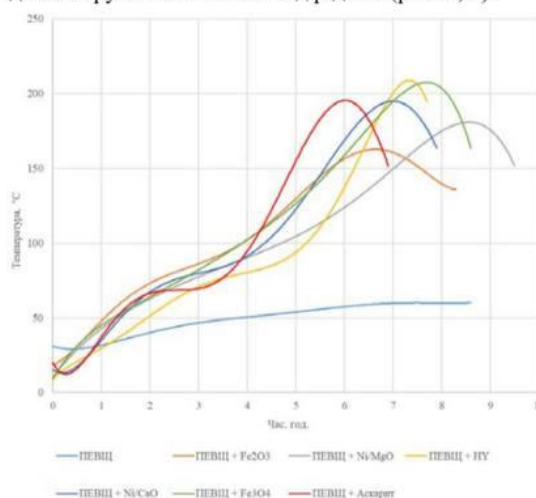


Рис. 2. Залежність температури пари від часу піролізу ПЕВЩ з використанням різних каталізаторів

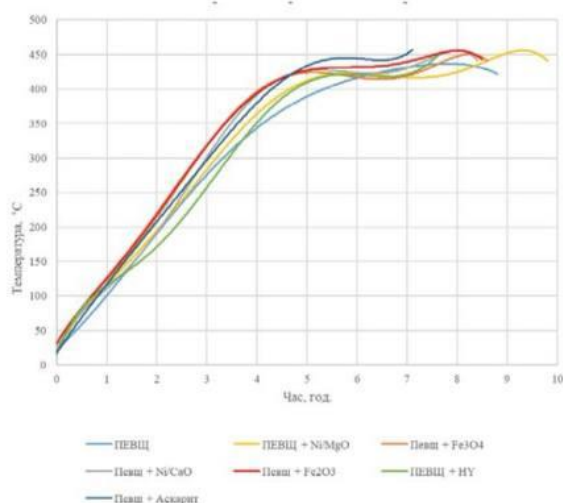


Рис. 3. Залежність температури реактора від часу піролізу ПЕВЩ з використанням різних каталізаторів

Коли температура реактора досягає 350–450 °С, починається руйнування полімерного ланцюга ПЕВЩ – розрив хімічних зв'язків С–С у полімерному ланцюзі та розпад на низькомолекулярні фрагменти, переважно на алкани, алкени та ароматичні сполуки. Відбувається утворення вільних радикалів – активних частинок, які можуть вступати в подальші реакції.

При досягненні температури 500–600 °С відбувається дегідрогенізація – видалення водню з органічних залишків, особливо цей процес прискорюється за допомогою використання металевих каталізаторів, формування стабільних циклічних структур і в кінцевому результаті – утворення твердого пірокарбону. Каталізatori Fe₃O₄, Fe₂O₃ сприяють утворенню організованих вуглецевих наноструктур (нанотрубок, нановібрил). Отриманий пірокарбон має високий вміст вуглецю (>80 %), пористу структуру, високу термічну та хімічну стійкість, електропровідність.

Каталітичний піроліз поліетилену високої щільності (ПЕВЩ) є перспективним методом переробки, що дозволяє ефективно перетворювати його на рідкі та газоподібні вуглеводні, а також утворювати пірокарбон з високим вмістом вуглецю. Використання каталізаторів сприяє зниженню температури процесу, підвищенню виходу рідких продуктів і формуванню організованих вуглецевих наноструктур. Аналіз механізмів термічного розкладу ПЕВЩ підтверджує, що контрольоване розщеплення полімерного ланцюга знижує кількість небажаних побічних речовин і дозволяє отримувати цінні вторинні продукти [4, 5]. Таким чином, каталітичний піроліз може бути ефективним способом переробки пластикових відходів, зменшуючи їх негативний вплив на навколишнє середовище.

Література

1. Shahina Riaz, Nabeel Ahmad, Wasif Farooq, Imtiaz Ali, Mohd Sajid, Muhammad Naseem Akhtar, «Catalytic Pyrolysis of Hdpe for Enhanced Hydrocarbon Yield: A Boosted Regression Tree Assisted Kinetics Study for Effective Recycling of Waste Plastic», 39 p, 25 Jun 2024. https://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract_id=4875481
2. Katok K. V., Tertykh V. A., Pavlenko A. M., Brychka S. Ya., Prykhodko G. P., «Pyrolytic synthesis of carbon nanostructures on Ni, Co / MCM-41 catalysts» // *Magisterium. Natural Sciences*. 2004. Issue. 16.
3. Lu Yao, Jianhua Zhu, Shuyuan Li, Yue Ma, Changtao Yue, «Analysis of liquid products and mechanism of thermal/catalytic pyrolysis of HDPE», *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 11 November 2022. <https://link.springer.com/article/10.1007/s10973-022-11745-2>
4. Sittichai Natesakhawat, Jennifer Weidman, Stephanie Garcia, Nicholas C. Means, Ping Wang «Pyrolysis of high-density polyethylene: Degradation behaviors, kinetics, and product characteristics», *Journal of the Energy Institute*, Volume 116, October 2024, 101738, 5 July 2024. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1743967124002162>
5. Enggar Hero Istoto, Widayat and Singgih Saptadi, «Production of Fuels From HDPE and LDPE Plastic Waste via Pyrolysis Methods», *E3S Web Conf.*, Volume 125, 2019, The 4th International Conference on Energy, Environment, Epidemiology and Information System (ICENIS 2019), Article Number 14011, 4 p, Section Renewable Energy. https://www.e3s-conferences.org/articles/e3sconf/abs/2019/51/e3sconf_icenis2019_14011/e3sconf_icenis2019_14011.html

CATALYTIC PYROLYSIS OF WASTE POLYMER MATERIALS

Olena IVANENKO

Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute, Ukraine
37, Prospect Beresteiskyi, Kyiv, 03056, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0001-6838-5400>

Bohdan KORINENKO

V.P. Kukhar Institute of Bioorganic Chemistry and Petrochemistry, Ukraine
1 Akademika Kukharia St., Kyiv, 02000, Ukraine
<https://orcid.org/0009-0001-7581-5656>

Igor BYCHKO

L. V. Pisarzhevskii Institute of Physical Chemistry, Ukraine
31 Nauky Ave., Kyiv, 03028, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0002-4164-3024>

Karolina VOJTENKO

Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute, Ukraine
37, Prospect Beresteiskyi, Kyiv, 03056, Ukraine
<https://orcid.org/0009-0008-5873-8573>

Artem MARTYNIUK

Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute, Ukraine
37, Prospect Beresteiskyi, Kyiv, 03056, Ukraine
<https://orcid.org/0009-0001-0822-2092>

Abstract

The feasibility of processing polymer waste, in particular high-pressure polyethylene (HDPE), by catalytic pyrolysis in order to obtain alternative energy sources: synthetic oil, pyrolysis gases and pyrocarbon has been demonstrated and substantiated. The thermal destruction of HDPE waste in a batch plant in the absence of atmospheric oxygen with and without the use of catalysts (Ni/MgO, Fe₂O₃, Ni/CaO, Fe₃O₄, HY, Ascarit) has been investigated. It was found that catalytic pyrolysis in the temperature range of 450°C contributes to an increase in the yield of liquid hydrocarbons, in particular synthetic oil, as well as to an improvement in the qualitative composition of the obtained fractions. It was determined that the use of catalysts contributes to a decrease in the content of the solid residue and an increase in the yield of the gas mixture.

Keywords: high-density polyethylene, pyrolysis, catalysts, pyrolysis liquid, pyrocarbon.

ISSN 2617-9741



**ВІСНИК НАЦІОНАЛЬНОГО
ТЕХНІЧНОГО УНІВЕРСИТЕТУ
УКРАЇНИ «КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ
ІНСТИТУТ ІМЕНІ ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»**

**Хімічна інженерія,
екологія та
ресурсозбереження**



3 (24) / 2025

ЕКОЛОГІЯ ТА РЕСУРСОЗБЕРЕЖЕННЯ

УДК 628.47

ІВАНЕНКО О. І.^{1*}, КАРВАЦЬКИЙ А. Я.¹, КОРІНЕНКО Б. В.², БИЧКО І. Б.³,
МАРТИНЮК А. С.¹, ТЕТЕРЯТНИКОВ Г. В.¹, ВОЙТЕНКО К. О.¹

¹ Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

² Інститут біоорганічної хімії та нафтохімії ім. В. П. Кухаря НАН України

³ Інститут фізичної хімії ім. Л. В. Писаржевського НАН України

КАТАЛІТИЧНИЙ ШВИДКИЙ ПРОЛІЗ ВІДХОДІВ ПОЛІЕТИЛЕНУ ВИСОКОЇ ЩІЛЬНОСТІ

З огляду на стрімке зростання обсягів полімерних відходів та обмеженість традиційних енергетичних ресурсів, актуальним є пошук ефективних технологій утилізації полімерів з можливістю отримання корисних продуктів. Одним із таких методів є каталітичний піроліз – термохімічний процес розкладу органічних матеріалів за відсутності кисню, який дає змогу перетворювати пластикові відходи на рідкі та газоподібні паливні продукти. Застосування каталізаторів у процесі піролізу дозволяє оптимізувати температурні умови реакції та впливати на склад отриманих продуктів. Поліетилен високої щільності (ПЕВЩ), що широко використовується у пакуванні та побуті, є одним з основних компонентів полімерних відходів і має значний потенціал для переробки саме таким способом. В статті показана та обґрунтована доцільність переробки ПЕВЩ методом каталітичного піролізу з метою отримання альтернативних джерел енергії: піролізних газів, піролізної рідини та пірокарбону. Досліджена термодеструкція відходів ПЕВЩ на установці періодичної дії за відсутності кисню повітря із застосуванням каталізаторів (Ni/MgO, Fe₂O₃, Ni/CaO, Fe₂O₃, Аскарит, НУ) та без них. Встановлено, що проведення швидкого каталітичного піролізу в температурному діапазоні до 450 °C сприяє підвищенню виходу рідких вуглеводнів, зокрема піролізної рідини, а також покращенню якісного складу отриманих газів. Методом газової хроматографії проведено аналіз продуктів піролізу, який показав значну частку насичених вуглеводнів. Визначено, що застосування каталізаторів сприяє зменшенню вмісту твердого залишку та підвищенню виходу газової суміші.

Ключові слова: поліетилен високої щільності, піроліз, каталізатори, утилізація полімерів, піролізний газ, піролізна рідина, пірокарбон

DOI: 10.20535/2617-9741.3.2025.340378

* Corresponding author: olenka.vasaynovich@gmail.com

Received 14 March 2025; Accepted 24 April 2025

Постановка проблеми. Поліетилен високої щільності є одним з найпоширеніших полімерів у побутовому та промисловому використанні завдяки його хімічній інертності, механічній міцності та стійкості до впливу вологи й хімікатів. Проте саме ці властивості зумовлюють його екологічну проблему: ПЕВЩ практично не піддається біологічному розкладу, а період його природної деградації становить від 100 до 500 років залежно від умов середовища (вологість, температура, УФ-випромінювання) [1].

Накопичення поліетиленових відходів на сміттєзвалищах та в довкіллі створює серйозну загрозу для екосистем, особливо у вигляді мікропластику. Традиційні методи утилізації (спалювання та захоронення) мають численні недоліки: високе енергоспоживання, викиди токсичних речовин, невідповідність сучасним екологічним стандартам.

На цьому тлі актуальним є впровадження більш ефективних методів глибокої термічної переробки полімерних матеріалів. Одним із таких методів є каталітичний піроліз – процес термічного розкладання полімерів в анаеробних умовах з використанням каталізаторів, що дає змогу отримувати цінні вторинні продукти: газову фракцію, піролізну рідину та пірокарбон [2].

Застосування каталізаторів дозволяє знизити температуру піролізу, підвищити вихід цільових рідких і газоподібних вуглеводнів, а також покращити якісні характеристики твердого залишку. Крім того, наявність каталізатора впливає на механізм реакції розщеплення полімерного ланцюга, що дозволяє керувати розподілом продуктів піролізу та зменшити кількість небажаних побічних компонентів.

Проте, незважаючи на позитивні результати, ряд наукових і технологічних питань залишається невирішеним. Серед них – вибір оптимального каталізатора для забезпечення високого виходу рідкої фази, дослідження впливу фізико-хімічних характеристик вихідного ПЕВЩ (зокрема ступеня забруднення та наявності домішок), зниження енерговитрат процесу і стабілізація якісного складу кінцевих фракцій.

Метою даного дослідження є вивчення особливостей каталітичного піролізу відходів ПЕВЩ з метою удосконалення процесу переробки полімерних матеріалів та отримання альтернативних енергоносіїв. Важливим в даному контексті є дослідити особливості каталітичного піролізу поліетилену високої щільності із застосуванням різних каталізаторів (Ni/MgO, Ni/CaO, Fe₂O₃, Fe₃O₄, Аскарит, НУ), проаналізувати вплив температурного режиму та складу каталізатора на вихід рідких, газоподібних і твердих продуктів, а також охарактеризувати якісні показники отриманих фракцій.

Аналіз попередніх досліджень. Каталітичний піроліз, як один із перспективних методів термічної переробки ПЕВЩ, активно досліджується в науковій спільноті, зокрема щодо підбору ефективних каталізаторів, температурних режимів і типів отримуваних продуктів.

В роботі [3] показана можливість використання комерційно доступного гетерогенного каталізатора Pt/Al₂O₃ при температурі 250 °C для зеленої трансформації ПЕВЩ у цінні довголанцюгові дикарбонові кислоти, такі як себацінова та додекандіонова кислоти, що мають вирішальне значення для синтезу нейлонів тощо. Така технологія не тільки має потенціал для мінімізації відходів полімерів, але й надає додаткові переваги для підтримки економіки та технічної еволюції економіки замкнутого циклу завдяки можливості повторного використання каталізатора.

Відомо, що полімери мають визначену межу термостійкості, за якою відбувається руйнування макромолекул. У випадку ПЕВЩ цей процес починається приблизно від 350–450 °C, коли ланцюги поліетилену розщеплюються з утворенням низькомолекулярних фрагментів [4].

В результаті проведення дослідження [5] було визначено, що процес термічного піролізу ПЕВЩ при температурах від 450 до 550 °C дає переважно рідкі вуглеводні, які здебільшого відповідають бензиновим фракціям. Вихід рідких продуктів у процесі піролізу складає близько 70-80 % від загальної маси переробленого матеріалу.

Каталітичний піроліз значно збільшує вихід рідких вуглеводнів у порівнянні з некаталітичним піролізом, забезпечуючи до 75-85 % рідких продуктів, які здебільшого складаються з бензинових і дизельних фракцій. Кінетичний аналіз процесу піролізу був проведений за допомогою методу Boosted Regression Tree (BRT), який дозволив побудувати точну математичну модель для прогнозування виходу продуктів залежно від різних параметрів процесу, таких як температура, час реакції і тип каталізатора. Завдяки цьому методу вдалося оптимізувати умови піролізу для досягнення максимальної ефективності: найкращі результати були отримані при температурах 550-600 °C і короткому часі піролізу, що сприяло мінімізації утворення небажаних побічних продуктів [6].

Використання мезопористої матриці MCM-41 як носія для каталізаторів Ni та Co дозволяє ефективно контролювати розмір та форму утворених вуглецевих наноструктур при процесі піролізу, який проводився при температурі близько 700 °C з використанням ацетилену (C₂H₂) як джерела вуглецю [7].

Автори публікацій [8, 9] звертають увагу на те, що існуючі технології переробки: механічна та хімічна, мають значні обмеження. Механічна переробка, при якій пластик подрібнюється та переплавляється, часто призводить до зниження якості матеріалу. Хімічна переробка, яка включає розкладання пластика на його складові частини, потенційно може забезпечити більшу ефективність, але вона залишається дорогою і технічно складною [9].

У експериментах при температурі 500 °C [10] дослідження охоплювало як швидкий термічний, так і каталітичний піроліз. Додавання каталізатора призвело до збільшення вмісту легких фракцій з 16,39 до 20,59 % масової частки та важких фракцій з 11,23 до 14,42 %, тоді як вміст середніх фракцій зменшився з 72,22 до 61,45 %.

В роботі [11] розібрані кінетичні аспекти піролізу ПЕВЩ з використанням математичних моделей для оцінки швидкості розкладу та визначення температурних параметрів, при яких процес відбувається найбільш ефективно. Виявилось, що піроліз має складну кінетику, яка залежить від різних факторів (температура, час і початкова маса матеріалу). Було визначено, що піроліз на початкових етапах має високу швидкість розкладу, але ця швидкість зменшується, коли більша частина полімеру вже розкладена.

Якщо порівнювати результати після процесу піролізу ПЕВЩ та ПЕНЩ при температурному діапазоні 450–621 °C без використання каталізаторів, перший сприяє отриманню більшої кількості нафти (3,25 літра і всього лише 0,85 літра бензину), тоді як другий дає вищий вихід бензину (2,9 літра бензину) [12].

Найвищий вихід піролізної рідини (61,05 % мас.) було досягнуто при швидкості нагрівання 2 °C/хв та тривалості реакції 75 хвилин. У цих умовах також спостерігався низький вихід твердих продуктів (0,41 % мас.) та газів (38,54 % мас.). Отримане піролізне масло мало вищу теплоту згоряння, що знаходиться в межах 44–45 МДж/кг, що відповідає показникам традиційного дизельного палива [13].

Незважаючи на значні успіхи, невирішеною частиною наукової проблеми є забезпечення стабільної якості піролізного продукту, уніфікація параметрів процесу для різних типів ПЕВЩ-відходів, зниження енергоспоживання процесу при збереженні високого виходу цільових продуктів. Також недостатньо вивчено вплив фізико-хімічних властивостей відходів ПЕВЩ (наприклад, наявність домішок, ступінь забруднення) на ефективність каталітичного розкладу.

Метою статті є дослідження механізмів каталітичного піролізу ПЕВЩ як перспективного методу глибокої термічної переробки полімерних відходів, а також аналіз впливу різних типів каталізаторів на термоліз поліетилену, вихід рідких і газоподібних фракцій, а також якісні характеристики пірокарбону.

Виклад основного матеріалу. Піроліз ПЕВЩ може відбуватися у двох основних режимах: звичайному (повільному) та швидкому. Основна різниця між ними полягає в швидкості нагріву, температурному режимі, виході продуктів та їх складі. Звичайний піроліз, що відбувається при температурі 600–800 °C, здатен скоротити час реакції, але кінцевими продуктами його проведення є газоподібні речовини та більш легкі вуглеводні, при цьому вихід газу зростає з підвищенням температури. Порівняно низькотемпературний піроліз при температурі 400–500 °C, при якому витрачається менше енергії, забезпечує переважно маслянистий матеріал в якості кінцевого продукту проведення процесу [11, 12].

При термічному розкладанні полімерів одночасно протікають два типи реакцій. Перша є випадковим розривом хімічних зв'язків, що призводить до зміни молекулярної маси і відновлення структури полімеру. Друга реакція пов'язана з розривом подвійних вуглецевих зв'язків, що призводить до утворення летких сполук. Аналіз складу та продуктів піролізу дозволяє зрозуміти механізми термічного розпаду полімерів.

Розкладання полімерів може відбуватися двома шляхами: механізм розриву ланцюга на кінцях молекули або випадкового розпаду всередині полімерної структури. У разі розкладання на кінцях ланцюга відбувається послідовне вивільнення мономерних ланок, що також називають деполімеризацією. Цей процес протікає за вільнорадикальним механізмом і є зворотним етапом полімеризації.

За такого типу розкладання молекулярна маса полімеру поступово зменшується, а основним продуктом реакції є мономери. Даний механізм можливий, якщо основні зв'язки у полімері слабші, ніж зв'язки бічних груп. Він спостерігається тільки у полімерних молекул, що мають активні кінцеві групи, такі як вільні радикали, катіони або аніони.

Швидкий піроліз представляє собою термічний розклад органічних сполук за відсутності кисню, що відбувається при температурах 400–600 °C за досить короткий проміжок часу [11]. При цьому процесі полімерні ланцюги розпадаються, утворюючи газоподібні (H₂, CO, CO₂, CH₄, C₂H₆ тощо), рідкі продукти (піролізне масло) і тверді залишки, серед яких знаходиться пірокарбон, який складається з елементарного вуглецю та мінеральних домішок (рис. 1).

Особливістю процесу є формування пірокарбону – твердої вуглецевої речовини, яка утворюється внаслідок неповного розкладу органічних полімерів та подальшої полімеризації вуглецевих радикалів. Каталізatori (Ni/MgO, Ni/CaO, Fe₃O₄, Fe₂O₃, Аскарит, НУ) відіграють важливу роль у регулюванні процесу розкладу та сприяють прискоренню реакцій утворення пірокарбону. Каталізатор – це речовина, яка вступає в хімічну реакцію та виходить з неї без змін, збільшуючи ймовірність цієї реакції. Каталізатор утворює нестабільний комплекс з реагентами, який на наступному етапі розпадається на необхідні продукти та каталізатор. Енергія активації цих процесів нижча, ніж енергія активації некаталітичних реакцій. Зниження енергії активації дозволяє проводити реакції в більш м'яких умовах, наприклад, при більш низьких температурах або при нормальному (атмосферному) тиску. Каталіз не зміщує рівноваги реакції, а лише прискорює її встановлення.

Коли температура реактора досягає 350–450 °C, починається руйнування полімерного ланцюга ПЕВЩ – розрив хімічних зв'язків C–C у полімерному ланцюзі та розпад на низькомолекулярні фрагменти, переважно на алкани, алкени та ароматичні сполуки. Відбувається утворення вільних радикалів – активних частинок, які можуть вступати в подальші реакції [6].

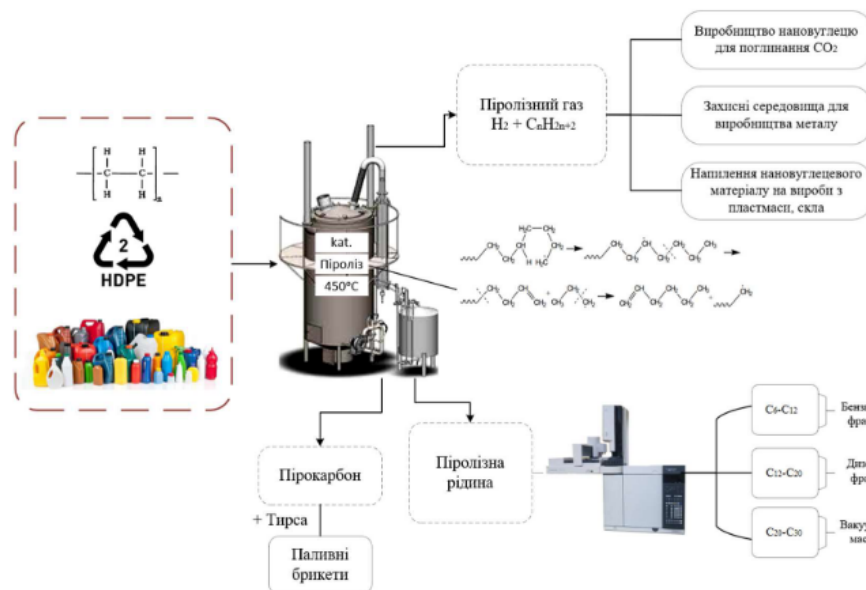


Рис. 1 – Переробка і подальше використання продуктів переробки поліетилену високої щільності

При досягненні температури 500-600 °C відбувається дегідрогенізація – видалення водню з органічних залишків, особливо цей процес прискорюється за допомогою використання металевих катализаторів, формування стабільних циклічних структур і в кінцевому результаті – утворення твердого пірокарбону [2]. Катализатори Fe_2O_3 , Fe_3O_4 сприяють утворенню організованих вуглецевих наноструктур (нанотрубок, нанопірилі). Отриманий пірокарбон має високий вміст вуглецю (>80 %), пористу структуру, високу термічну та хімічну стійкість, електропровідність.

Одержання цеоліту Y у водневій формі (HY) досяглось шляхом переведення початкового цеоліту NaY у водневу форму наступним чином. NaY суспендували в 1M розчині NH_4Cl (10 cm^3 розчину на кожен грам цеоліту) за 80 °C протягом 8 год при інтенсивному перемішуванні. Після цього матеріали промивали водою до досягнення pH 7-8, а потім сушили за 100 °C протягом ночі та прожарювали за температури 300 °C протягом 6 год.

Аскарит представляє собою азбест, просочений плавленням NaOH. Аскарит характеризується великою сорбційною ємністю по CO_2 та воді і не підлягає регенерації. Використовується без додаткової обробки чи активації.

Катализатори Fe_2O_3 та Fe_3O_4 є комерційними реагентами Thermo Fisher Scientific чистотою >95% та >97% відповідно.

Катализатор Ni/CaO (40% Ni) готували шляхом розчинення 23,6 г $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2(\text{H}_2\text{O})_4$, 19,4 г $\text{Ni}(\text{NO}_3)_2(\text{H}_2\text{O})_6$ та 20 г лимонної кислоти у 200 cm^3 H_2O . Отриманий розчин випаровували в печі за 120 °C до утворення гелю, який згодом прокалювали за 700 °C протягом 5 годин.

Катализатор Ni/MgO (50% Ni) готували шляхом розчинення 3,88 г $\text{Ni}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, 5,12 г $\text{Mg}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ та 4 г лимонної кислоти у 40 cm^3 H_2O . Отриманий розчин випаровували в печі за 120 °C до утворення гелю, який згодом прокалювали за 700 °C протягом 5 годин.

Каталітичний піроліз поліетилену високої щільності (ПЕВЩ) проводився на лабораторній установці періодичної дії, принципова технологічна схема якої представлена на рис. 2. Установка складалася з наступних основних елементів: ЛАТР (1) – регулятор напруги для живлення нагрівача, реактор (2) – сталева герметична камера, в якій відбувався піроліз, термопари (3) для контролю температури, ректифікаційної

Утворена в результаті піrolізу парогазова суміш проходила крізь ректифікаційну колону для попереднього фракціонування, після чого спрямовувалась до повітряного холодильника, де основна частина піrolізної рідини конденсувалась. Через алонж пари направлялись до приймального балона, де збирався конденсат (піrolізна рідина). Після завершення процесу установка охолоджувалась до температури 30-35 °C, реактор відкривався, і залишок – пірокарбон – вручну вивантажувався та зважувався. Усі зібрані фракції піддавались подальшому аналізу. Отриману продукцію після завершення циклу охолоджували, витлучали твердий залишок (пірокарбон), зважували на технічних вагах, відібрану газову фазу передавали на хроматографічний аналіз.

Інші гази аналізувалися з використанням газового хроматографа (Agilent Technologies 7890 А) (Компанія Agilent Technologies, США) з полум'яно-іонізаційним детектором з використанням кварцової капілярної колонки довжиною 60 м, внутрішнім діаметром 0,320 мм з середньополярною ціанопропілметилсиліконовою (6 % ціанопропіл-, 94 % метилполісілоксан) нерухомою фазою DB-624 UI (товщина шару 1,8 мкм) в режимі програмування температури.

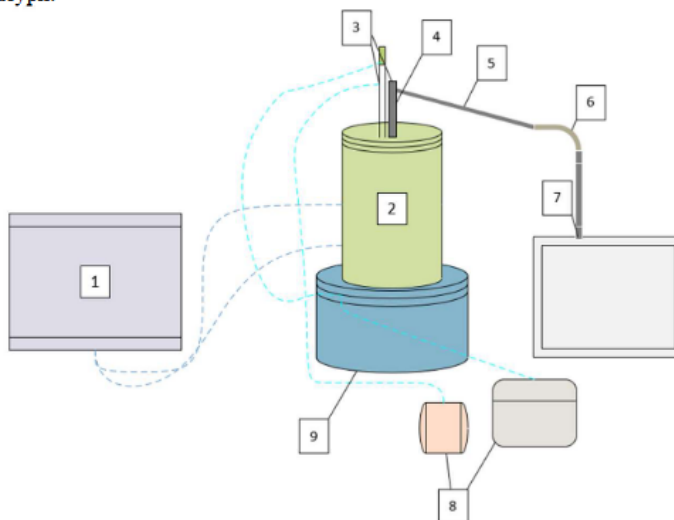


Рис. 2 – Принципова технологічна схема установки для каталітичного низькотемпературного піролізу: 1 – ЛАТР; 2 – реактор; 3 – термопари; 4 – ректифікаційна колонка; 5 – повітряний холодильник; 6 – алонж; 7 – приймач; 8 – датчики температури; 9 – підставка/термоізолятор до реактора

На основі табл. 1 встановлено, що найвищий вихід піролізної рідини було досягнуто при використанні каталізаторів Аскарит (36,00 %), Ni/CaO (34,09 %), Ni/MgO (31,74 %), а також Fe₂O₃ (32,77 %). Найменший вихід рідини зафіксовано в досліді з каталізатором НУ–10,53 %, що не перевищує результат некаталітичного піролізу (17,55 %), який включав менше залишкових фракцій та кращу стабільність температурного режиму.

Усі каталізатори сприяли зменшенню утворення твердого залишку (пірокарбону) порівняно з піролізом без каталізатора. Найменшу масу пірокарбону (10,5–12,2 г) отримано в досліді з Ni/CaO та Fe₂O₃. Найбільшу – з НУ та Аскаритом, відповідно 21,1 г і 13,4 г.

Під час експерименту досліджувалися такі параметри як температура реактора і температури пари в залежності від каталізатора, графіки зображені на Рис. 3 і 4 відповідно.

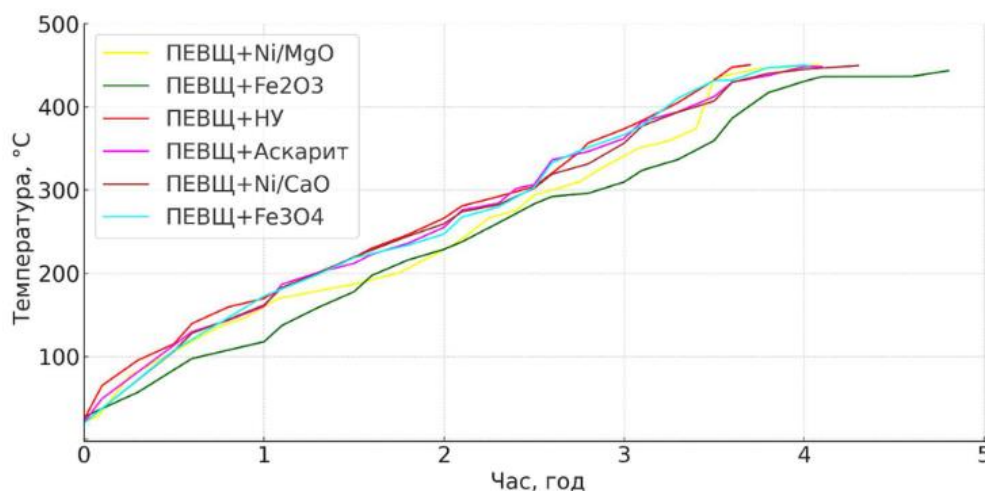


Рис. 3 – Залежність температури парів від часу піролізу ПЕВЩ з використанням різних каталізаторів

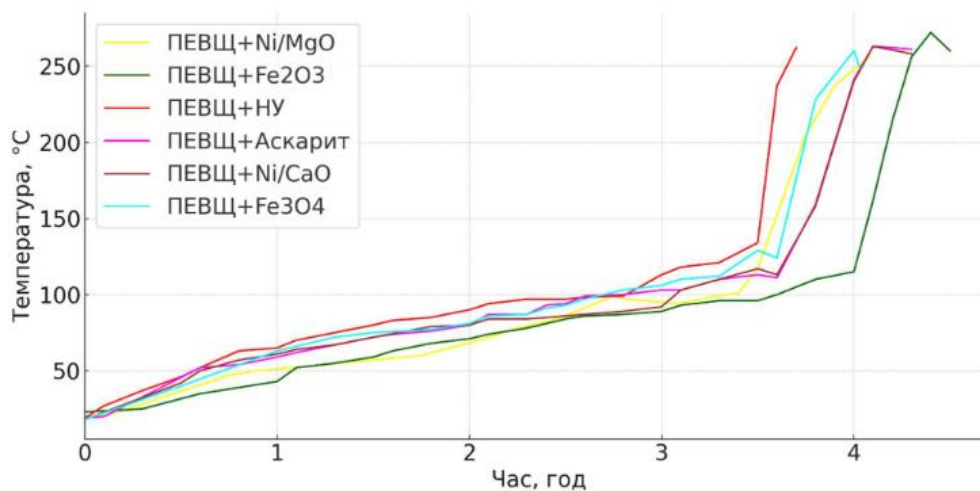


Рис. 4 – Залежність температури реактора від часу піролізу ПЕВЩ з використанням різних каталізаторів

Таблиця 1 – Матеріальний баланс піролізної переробки/термодеструкції ПЕВЩ

Проба	% (мас.)												
	Во- день	Оксид вуг- лецю (II)	Оксид вуг- лецю (IV)	Ме- тан	Етан	Про- пан	Бу- тан	Пен- тан	Ізо- бу- тан	Ізо- пен- тан	Ізо- гек- сан	Ме- танол	Ета- нол
1. ПЕВЩ	0,68	25,02	21,23	5,36	15,73	24,53	6,54	0,46	–	0,46	0,42	0,01	–
2. ПЕВЩ + НУ	0,48	20,49	43,77	2,60	7,99	14,73	4,11	0,22	4,94	0,33	0,30	0,01	0,04
3. ПЕВЩ + Fe ₃ O ₄	0,77	24,80	29,76	4,25	13,01	21,32	6,09	0,44	–	0,43	0,43	0,01	–
4. ПЕВЩ + Ni/MgO	0,64	23,19	32,80	3,58	12,25	20,35	6,44	0,67	–	0,56	0,60	0,02	–
5. ПЕВЩ + Ni/CaO	3,71	11,05	5,86	9,54	16,90	33,68	14,42	1,88	–	1,10	1,81	0,03	–
6. ПЕВЩ + Fe ₂ O ₃	0,54	20,81	24,09	4,98	15,27	24,88	7,41	0,73	–	0,58	0,68	0,02	–
7. ПЕВЩ + Аскарит	1,60	12,54	17,73	5,58	18,22	31,47	10,07	1,07	–	0,73	0,97	0,03	–

Таблиця 2 – Результати хроматографічного аналізу продуктів піролізу ПЕВЩ+кат.

Найменування	m ₁ , г	m ₂ , г	m ₃ , г	m ₄ , г	V _{газ} , см ³	Час, год
ПЕВЩ	100	–	17,55	73,47	2000	4,08
ПЕВЩ + НУ	100	2,5	10,53	86,08	1000	3,43
ПЕВЩ + Ni/MgO	100	2,5	31,74	63,00	1500	4,10
ПЕВЩ + Ni/CaO	100	2,5	34,09	59,50	2000	4,20
ПЕВЩ + Fe ₂ O ₃	100	2,5	32,77	62,33	2000	4,16
ПЕВЩ + Fe ₃ O ₄	100	2,5	20,79	73,79	2000	3,53
ПЕВЩ + Аскарит	100	2,5	36,00	57,05	2000	4,40

де: m₁ – маса завантаження; m₂ – маса каталізатора; m₃ – маса рідкої фракції; m₄ – маса залишку/пірокарбону.

Хроматографічний аналіз газової фази засвідчив залежність газового складу від природи каталізатора (табл. 2):

- Найбільший вміст водню (3,71 %) було зафіксовано при використанні Ni/CaO, що свідчить про ефективність дегідрування;
- Найвищий вміст пропану (33,68 %) і бутану (14,42 %) також відповідав Ni/CaO, що вказує на його здатність сприяти утворенню розгалужених вуглеводнів;
- Найвищі концентрації CO₂ (43,77 %) виявлено у досліді з НУ, що свідчить про активацію реакцій декарбосилування;
- Каталізатори Fe₂O₃ та Fe₃O₄ переважно сприяли формуванню C₂–C₃ вуглеводнів (етан, пропан), а також збільшували вміст окислювальних газів (CO, CO₂).

Каталізатор Ni/MgO показав найкращий баланс між високим виходом рідини, стабільністю температурного режиму і складом піролізного газу. Ni/CaO відзначився максимальним виділенням водню, що може бути корисним для подальших енергетичних застосувань. Окисні каталізатори (Fe₂O₃, Fe₃O₄) активували реакції дегідрування та декарбонілювання, забезпечуючи гарну якість піролізного масла.

Висновки. Проведене дослідження підтвердило ефективність каталітичного піролізу поліетилену високої щільності (ПЕВЩ) як перспективного способу переробки полімерних відходів із отриманням газоподібних, рідких і твердих вуглеводневих продуктів. Застосування каталізаторів дозволило суттєво підвищити вихід піролізної рідини, скоротити тривалість процесу, покращити склад синтез-газу та зменшити

кількість твердого залишку. Найвищий вихід рідкої фракції (до 34,09 %) спостерігався при використанні каталізатора Ni/CaO, тоді як Ni/MgO і Fe₃O₄ забезпечили лише незначно нижчі результати. Газохроматографічний аналіз підтвердив, що Ni/CaO сприяв утворенню найбільшої кількості водню (до 3,71 %) і розгалужених вуглеводнів, зокрема пропану та бутану, що свідчить про інтенсифікацію дегідрувальних та ізомеризаційних процесів. Каталізатори Fe₃O₄ і Fe₂O₃ активували утворення продуктів з переважанням фрагментів з двома та трьома атомами вуглецю, а також значних кількостей CO та CO₂, що вказує на участь окислювальних реакцій. Каталізатор H₂ забезпечував найвищу частку CO₂ серед усіх досліджених зразків, що свідчить про активацію декарбонізації. За результатами всіх дослідів найефективнішими з позицій енергетичної цінності, масової продуктивності та газового складу виявились Ni/MgO та Ni/CaO. Отримана піролізна рідина має теплоту згоряння на рівні 44–45 МДж/кг, що робить його придатним для використання як альтернативного палива. Твердий залишок (пірокарбон) характеризується високою вуглецевою концентрацією, а отже, може застосовуватись як сировина для електродів або сорбентів. Перспективами подальших досліджень є оптимізація складу каталізаторів, поглиблений аналіз їх поверхневих властивостей, перехід до безперервного режиму піролізу, а також оцінка вуглецевого сліду процесу для підвищення його екологічної ефективності.

Перспективи подальших досліджень. Поглиблений аналіз структури, кислотно-основних властивостей та морфології каталізаторів з метою створення більш активних і селективних систем для підвищення виходу цільових продуктів, таких як піролізне масло та пірокарбон. Поглиблений аналіз фізико-хімічних характеристик пірокарбону, вивчення його потенційного застосування в електроніці, енергетиці, сорбції токсичних речовин, виготовленні електродів для суперконденсаторів. Створення технологічних схем, які поєднують каталітичний піроліз із сортуванням та попередньою обробкою пластикових відходів, а також повторне використання газових та рідких фракцій у якості джерела енергії або сировини. Комплексне дослідження вуглецевого сліду процесу, енерговитрат та загального впливу на довкілля, що дозволить обґрунтувати використання каталітичного піролізу в умовах сталого розвитку.

Список використаної літератури

1. Md. Golam Kibria, Nahid Imtiaz Masuk, Rafat Safayet та ін. Plastic Waste: Challenges and Opportunities to Mitigate Pollution and Effective Management // *International Journal of Environmental Research*. – 2023.
2. Коріненко Б. В., Худоярова О. С., Хутько М. В., Ранський А. П. Особливості термодеструкції вторинної полімерної сировини // *Вісник Вінницького політехнічного інституту*. – 2021. – № 1. – С. 29–36.
3. Wenyu Wu Klingler, Lucie Perret, Patrick Rupper та ін. A facile methodology for side- and upcycling of HDPE waste via partial creation of unsaturated double bonds // *Green Chemistry*. – 2024. – Т. 26, № 20. – С. 10353–10622.
4. Суберляр О. В., Баштанник П. І. Технологія переробки полімерних та композиційних матеріалів. – Київ: Україна, 2006. – 270 с.
5. Al-Salem S. M. Thermal pyrolysis of high density polyethylene (HDPE) in a novel fixed bed reactor system for the production of high value gasoline range hydrocarbons (HC) // *Process Safety and Environmental Protection*. – 2019. – Т. 127. – С. 171–179.
6. Riaz S., Ahmad N., Farooq W. та ін. Catalytic Pyrolysis of HDPE for Enhanced Hydrocarbon Yield: A Boosted Regression Tree Assisted Kinetics Study for Effective Recycling of Waste Plastic // *npj Materials Sustainability*. – 2024. – 25 червня.
7. Каток К. В., Тьортих В. А., Павленко А. М. та ін. Піролітичний синтез вуглецевих наноструктур на Ni, Co / MCM-41 каталізаторах // *Магістеріум. Природничі науки*. – 2004. – Вип. 16.
8. Деркач Ф. А. Хімія. – Львів: Львівський університет, 1968. – 312 с.
9. Singh N., Walker T. R. Plastic recycling: A panacea or environmental pollution problem // *npj Materials Sustainability*. – 2024. – Т. 2, № 17. – 1 серпня.
10. Yao L., Zhu J., Li S. та ін. Analysis of liquid products and mechanism of thermal/catalytic pyrolysis of HDPE // *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*. – 2022. – 11 листопада.
11. Natesakhawat S., Weidman J., Garcia S. та ін. Pyrolysis of high-density polyethylene: Degradation behaviors, kinetics, and product characteristics // *Journal of the Energy Institute*. – 2024. – Т. 116. – 5 липня.
12. Istoto E. H., Widayat, Saptadi S. Production of Fuels From HDPE and LDPE Plastic Waste via Pyrolysis Methods // *E3S Web Conf*. – 2019. – Т. 125. – Art. № 14011.
13. Ghaffar N. F. A., Johari A., Abdullah T. A. T., Ripin A. Catalytic Cracking of High Density Polyethylene Pyrolysis Vapor over Zeolite ZSM-5 towards Production of Diesel // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. – 2019. – Т. 808. – С. 27–28. – 8th Conference on Emerging Energy & Process Technology (CONCEPT 2019).

Olena Ivanenko, Anton Karvatskyi, Bohdan Korinenko, Ihor Bychko, Artem Martyniuk, Hlib Teteryatnikov, Karolina Voitenko

CATALYTIC FAST PYROLYSIS OF HIGH-DENSITY POLYETHYLENE WASTE

Given the rapid increase in polymer waste volumes and the limited availability of traditional energy resources, the search for efficient polymer disposal technologies capable of generating valuable products has become highly relevant. One such method is catalytic pyrolysis—a thermochemical decomposition process of organic materials in the absence of oxygen, which enables the conversion of plastic waste into liquid and gaseous fuel products. The use of catalysts in the pyrolysis process allows for the optimization of reaction temperature conditions and influences the composition of the resulting products.

High-density polyethylene (HDPE), widely used in packaging and household applications, is one of the primary components of polymer waste and holds significant potential for recycling through this method. The article demonstrates and substantiates the feasibility of processing HDPE via catalytic pyrolysis to produce alternative energy sources, such as synthetic oil, pyrolysis gases, and pyrocarbon.

The thermodestruction of HDPE waste was studied in a batch reactor under oxygen-free conditions using various catalysts (Ni/MgO, Fe₂O₃, Ni/CaO, Fe₃O₄, ascarite, and HY) and without them. It was found that fast catalytic pyrolysis in the temperature range up to 450 °C promotes an increased yield of liquid hydrocarbons, particularly synthetic oil, as well as an improved composition of the resulting gases. Gas chromatography analysis of the pyrolysis products revealed a significant proportion of saturated hydrocarbons. The use of catalysts was also found to reduce the amount of solid residue and increase the yield of the gas mixture.

Keywords: high-density polyethylene, pyrolysis, catalysts, polymer recycling, pyrolysis gas, pyrolysis liquid, pyrocarbon

References

1. Kibria, M. G., Masuk, N. I., Safayet, R., Nguyen, H. Q., & Mourshed, M. (2023, January 20). Plastic waste: Challenges and opportunities to mitigate pollution and effective management. *International Journal of Environmental Research*.
2. Korinenko, B. V., Khudoyarova, O. S., Khutko, M. V., & Ranskyi, A. P. (2021). Osoblyvosti termodestruktsii vtrornnoi polimernoi syrovyny [Features of thermodestruction of secondary polymer raw materials]. *Visnyk Vinnytskoho Politekhnicnoho Instytutu*, (1), 29–36.
3. Klingler, W. W., Perret, L., Rupper, P., Lehner, S., Zhou, X., Eliasson, H., Muff, R., Heuberger, M., & Gaan, S. (2024). A facile methodology for side- and upcycling of HDPE waste via partial creation of unsaturated double bonds. *Green Chemistry*, 26(20), 10353–10622.
4. Suberlyar, O. V., & Bashtannik, P. I. (2006). Tekhnolohiia pererobky polimernykh ta kompozytsiynykh materialiv [Technology of polymer and composite material recycling]. Kyiv, Ukraine: Ukraina.
5. Al-Salem, S. M. (2019). Thermal pyrolysis of high density polyethylene (HDPE) in a novel fixed bed reactor system for the production of high value gasoline range hydrocarbons (HC). *Process Safety and Environmental Protection*, 127, 171–179.
6. Riaz, S., Ahmad, N., Farooq, W., Ali, I., Sajid, M., & Akhtar, M. N. (2024, June 25). Catalytic pyrolysis of HDPE for enhanced hydrocarbon yield: A boosted regression tree assisted kinetics study for effective recycling of waste plastic.
7. Katok, K. V., T'ortykh, V. A., Pavlenko, A. M., Brychka, S. Y., & Prykhodko, H. P. (2004). Pirolichnyi syntez vuhlevykh nanostruktur na Ni, Co / MCM-41 katalizatorakh [Pyrolytic synthesis of carbon nanostructures on Ni, Co / MCM-41 catalysts]. *Magisterium. Pryrodnychi Nauky*, (16).
8. Derkach, F. A. (1968). *Khimia [Chemistry]*. Lviv, Ukraine: Lvivskyi Universytet.
9. Singh, N., & Walker, T. R. (2024, August 1). Plastic recycling: A panacea or environmental pollution problem. *npj Materials Sustainability*, 2(17).
10. Yao, L., Zhu, J., Li, S., Ma, Y., & Yue, C. (2022, November 11). Analysis of liquid products and mechanism of thermal/catalytic pyrolysis of HDPE. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*.
11. Natesakhawat, S., Weidman, J., Garcia, S., Means, N. C., & Wang, P. (2024, July 5). Pyrolysis of high-density polyethylene: Degradation behaviors, kinetics, and product characteristics. *Journal of the Energy Institute*, 116.
12. Istoto, E. H., Widayat, & Saptadi, S. (2019). Production of fuels from HDPE and LDPE plastic waste via pyrolysis methods. *E3S Web of Conferences*, 125, 14011.
13. Ghaffar, N. F. A., Johari, A., Abdullah, T. A. T., & Ripin, A. (2019, November). Catalytic cracking of high density polyethylene pyrolysis vapor over zeolite ZSM-5 towards production of diesel. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* (Vol. 808, pp. 27–28). 8th Conference on Emerging Energy & Process Technology (CONCEPT 2019).