

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
ВІННИЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

# ВІСНИК ВІННИЦЬКОГО ПОЛІТЕХНІЧНОГО ІНСТИТУТУ

Науковий журнал

Засновник і видавець: Вінницький національний технічний університет

Виходить 6 разів на рік

Заснований у грудні 1993 року

**№ 2 (167) 2023**

Схвалено Вченою радою  
Вінницького національного технічного університету,  
протокол № 12 від 4.05.2023 р.

© Вінницький національний технічний університет, 2023

Вінниця • ВНТУ • 2023

Журнал «Вісник Вінницького політехнічного інституту» є виданням, яке входить до Переліку наукових фахових видань України у галузі технічних наук (**категорія Б**) за спеціальностями: 121, 122, 123, 124, 125, 126, 131, 132, 133, 141, 144, 151, 152, 163, 172, 183, 275, а також 01.05.00, 05.02.02, 05.02.10, 05.03.05, 05.09.03, 05.11.00, 05.13.05, 05.13.06, 05.12.13, 05.12.20, 05.14.02, 05.14.06, 05.22.20, 05.23.02, 05.23.05 (накази Міністерства освіти і науки України: від 11.07.2019 р. та № 975, від 15.10.2019, № 1301);

Журнал входить у міжнародні наукометричні бази Index Copernicus International та Google Scholar і реферується в Українському реферативному журналі «Джерело».

Журнал публікує статті, які містять нові теоретичні та практичні результати в галузях технічних, економічних, природничих та гуманітарних наук. Публікуються також огляди сучасного стану розв'язання важливих наукових проблем, огляди наукових та методичних конференцій, які відбулися у ВНТУ, статті з педагогіки вищої освіти.

Розділи журналу:

- ☒ автоматика та інформаційно-вимірювальна техніка;
- ☒ будівництво;
- ☒ гуманізація і гуманітаризація технічної освіти;
- ☒ застосування результатів досліджень;
- ☒ екологія та екологічна безпека;
- ☒ економіка та менеджмент;
- ☒ енергетика, електротехніка та електромеханіка;
- ☒ інформаційні технології та комп'ютерна техніка;
- ☒ машинобудування і транспорт;
- ☒ радіоелектроніка та радіоелектронне апаратобудування;
- ☒ стратегія, зміст та нові технології підготовки спеціалістів з вищою технічною освітою;
- ☒ рецензії;
- ☒ ювілеї і ювіляри.

Сайт журналу <https://visnyk.vntu.edu.ua/>

DOI журналу <https://doi.org/10.31649/1997-9266>

---

Адреса редакції:  
ВНТУ, к. 112 ГНК,  
вул. Хмельницьке шосе, 95,  
м. Вінниця, Україна, 21021

Контакти:  
E-mail: [visnykvpi@gmail.com](mailto:visnykvpi@gmail.com)

## Редакційна колегія

### Головний редактор

**Мокін Б. І.**, академік НАПН України, д-р техн. наук, професор (ВНТУ).

### Заступники головного редактора

**Біліченко В. В.**, д-р техн. наук, професор (ВНТУ); **Гرابко В. В.**, д-р техн. наук, професор (ВНТУ).

### Відповідальний секретар редколегії

**Дерібо О. В.**, канд. техн. наук, доцент (ВНТУ).

### Відповідальна за присвоєння індексів DOI

**Войцеховська О. О.**, д-р філософії (ВНТУ).

### Члени редакційної колегії

#### Технічні науки:

**Азаров О. Д.**, д-р техн. наук, професор, (ВНТУ); **Багацький В. О.**, д-р техн. наук, професор (ІК); **Білінський Й. Й.**, д-р техн. наук, професор (ВНТУ); **Бісікало О. В.**, д-р техн. наук, професор (ВНТУ); **Василенко В. Б.**, д-р філософії, професор (Новий університет Лісабона, Португалія); **Васілевський О. М.**, д-р техн. наук, професор; **Войцек В.**, д-р техн. наук, професор (Державний університет «Люблінська Політехніка», Польща); **Григорова К.**, д-р філософії (Русенський університет «Ангел Кинчев», Болгарія); **Грушко О. В.**, д-р техн. наук, професор (ВНТУ); **Губинський М. В.**, д-р техн. наук, професор (УДУНТ); **Данилов В. Я.**, д-р техн. наук, професор (НТУУ «КПІ»); **Дінь Тхань Вьст**, д-р філософії, доцент, (Університет м. Дананг, В'єтнам); **Дубовой В. М.**, д-р техн. наук, професор (ВНТУ); **Іскович-Лотоцький Р. Д.**, д-р техн. наук, професор (ВНТУ); **Кветний Р. Н.**, член-кор. НАПН України, д-р техн. наук, професор (ВНТУ); **Кичак В. М.**, д-р техн. наук, професор (ВНТУ); **Ковтун В. В.**, д-р техн. наук, професор (ВНТУ); **Козлов Л. Г.**, д-р техн. наук, професор (ВНТУ); **Комар В. О.**, д-р техн. наук, професор (ВНТУ); **Кулик В. В.**, д-р техн. наук, доцент (ВНТУ); **Кучерук В. Ю.**, д-р техн. наук, професор (УНУС); **Кухарчук В. В.**, д-р техн. наук, професор (ВНТУ); **Лежнюк П. Д.**, д-р техн. наук, професор (ВНТУ); **Лужецький В. А.**, д-р техн. наук, професор (ВНТУ); **Майєр Г.**, д-р наук хабілітований, професор, (Інститут Макса Планка (структури і динаміки матерії), Гамбург, Німеччина); **Мартинюк Т. Б.**, д-р техн. наук, професор (ВНТУ); **Михалевич В. М.**, д-р техн. наук, професор (ВНТУ); **Мокін В. Б.**, д-р техн. наук, професор (ВНТУ); **Мокін О. Б.**, д-р техн. наук, професор (ВНТУ); **Моргун А. С.**, д-р техн. наук, професор (ВНТУ); **Осадчук В. С.**, д-р техн. наук, професор (ВНТУ); **Осадчук О. В.**, д-р техн. наук, професор (ВНТУ); **Павлов С. В.**, д-р техн. наук, професор (ВНТУ); **Петрук В. Г.**, д-р техн. наук, професор (ВНТУ); **Поліщук Л. К.**, д-р техн. наук, професор, (ВНТУ); **Поляков А. П.**, д-р техн. наук, професор, (ВНТУ); **Постолатій В. М.**, академік АН Молдови, д-р техн. наук (Інститут енергетики АН Молдови, Молдова); **Ранський А. П.**, д-р хім. наук, професор (ВНТУ); **Романюк О. Н.**, д-р техн. наук, професор (ВНТУ); **Русу Іоан**, д-р інженерії, професор (Технічний університет ім. Георге Асакі, м. Ясси, Румунія); **Савуляк В. І.**, д-р техн. наук, професор (ВНТУ); **Сакалова Г. В.**, д-р техн. наук, професор (ВДПУ); **Семенов А. О.**, д-р техн. наук, професор (ВНТУ); **Стратан Іон**, д-р техн. наук, професор (Технічний університет Молдови, Молдова); **Ткаченко С. Й.**, д-р техн. наук, професор (ВНТУ); **Трофимчук О. М.**, член-кор. НАН України, д-р техн. наук, професор (ІТГП); **Штовба С. Д.**, д-р техн. наук, професор (ДНУ), **Яремчук Ю. Є.**, д-р техн. наук, професор (ВНТУ).

#### Педагогічні науки:

**Джеджула О. М.**, д-р пед. наук, професор (ВНАУ); **Ключко В. І.**, д-р пед. наук, професор (ВНТУ); **Корнієнко В. О.**, д-р політ. наук, професор (ВНТУ); **Куцевол О. М.**, д-р пед. наук, професор (ВДПУ); **Петрук В. А.**, д-р пед. наук, професор (ВНТУ); **Ратніков В. С.**, д-р, філос. наук, професор (ВНТУ); **Хома О. І.**, д-р філос. наук, професор (ВНТУ); **Хом'юк І. В.**, д-р пед. наук, професор (ВНТУ).

#### Економічні науки:

**Карачина Н. П.**, д-р екон. наук, професор (ВНТУ); **Мороз О. В.**, д-р екон. наук, професор (ВНТУ); **Мороз О. О.**, д-р екон. наук, професор (ВНТУ).

#### Використані скорочення:

ВДПУ — Вінницький державний педагогічний університет імені Михайла Коцюбинського, Україна;

ВНАУ — Вінницький національний аграрний університет, Україна;

ВНТУ — Вінницький національний технічний університет, Україна;

ДНУ — Донецький національний університет ім. В. Стуса, Вінниця, Україна;

ІК — Інститут кібернетики імені В. М. Глушкова НАН України, Київ, Україна;

ІТГП — Інститут телекомунікацій і глобального інформаційного простору НАН України, Київ, Україна;

НТУУ «КПІ» — Національний технічний університет України «КПІ ім. І. Сікорського», Київ, Україна;

УДУНТ — Український державний університет науки і технологій, Дніпро, Україна.

УНУС — Уманський національний університет садівництва, Україна

Відповідальний за випуск Дерібо О. В.

# ЗМІСТ

DOI випуску <https://doi.org/10.31649/1997-9266-2023-167-2>

## ЕКОЛОГІЯ, ЕКОЛОГІЧНА БЕЗПЕКА

- Ранський А. П., Коріненко Б. В.** Альтернативна енергетика: отримання синтез-нафти в процесі піролізної переробки поліпропіленових відходів ..... 6
- Криховець О. В., Слободяник В. Г.** Дослідження плівок на основі полівінілового спирту як екологічного гнучкого пакування..... 15
- Сунь Сяодун, Іщенко В. А.** Поводження з використаними літій-іонними батареями в Китаї ..... 21

## ЕНЕРГЕТИКА, ЕЛЕКТРОТЕХНІКА ТА ЕЛЕКТРОМЕХАНІКА

- Ткаченко С. Й., Власенко О. В.** Нестационарний теплообмін — визначення коефіцієнта тепловіддачі стаціонарним методом та методом регулярного теплового режиму..... 28
- Степанов Д. В., Резидент Н. В.** Ефективність газопоршневих когенераційних установок в системах централізованого тепlopостачання ..... 36

## ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА КОМП'ЮТЕРНА ТЕХНІКА

- Мокін Б. І., Мокін О. Б., Шалагай Д. О.** Перші два етапи системного аналізу плану відбудови енергетики України в напрямку інтеграції в неї відновлювальних джерел..... 42
- Штовба С. Д., Петричко М. В., Петранова М. Ю.** Метрика схожості категоріальних розподілів, що враховує спорідненість різних категорій ..... 49
- Крижановський В. Г.** Ентропія та кількість інформації у технічних позначеннях ..... 58
- Здітовецький Ю. С., Бісікало О. В., Іванов Ю. Ю.** Інтелектуальна інформаційна система розпізнавання та аналізу складу продуктів харчування ..... 66
- Редько І. В., Зилевич М. О.** Теоретичні основи програмної релятивізації у технологічних системах програмування..... 72
- Романюк О. Н., Мельник О. В., Шмалюх В. А.** Метод прискореної кругової інтерполяції на гексагональному растрі ..... 81
- Карпінець В. В., Катаєв В. С., Павловський П. В., Гереш Д. Ю.** Засіб захисту аналогового телефонного зв'язку на основі скремблера зі зміною коефіцієнтів вейвлет-перетворення..... 89
- Жданова О. Г., Коваленко В. В.** Задача складання розкладу виконання робіт з урахуванням їхніх часових вікон ..... 97
- Салієва О. В., Зоря І. С., Бондаренко І. О., Берестенко М. О.** Підвищення достовірності автентифікації користувача на основі захищеного електронного ключа та поведінкової біометрії..... 102

## МАШИНОБУДУВАННЯ ТА ТРАНСПОРТ

- Савуляк В. І., Дмитрієв М. С., Шенфельд В. Й., Шаргородський К. С.** Функціональні покриття, які наплавлені з використанням гнучких електродних стрічок..... 112
- Смолін Ю. О.** Методика вибору кроку дискретизації індикаторних діаграм у цифрових методах контролю параметрів ДВЗ..... 119

## РАДІОЕЛЕКТРОНІКА ТА РАДІОЕЛЕКТРОННЕ АПАРАТОБУДУВАННЯ

- Білинський Й. Й., Скалецька М. О.** Аналіз методів та засобів вимірювання вологості сипких продуктів ..... 125
- Сокольський С. О., Мовчанюк А. В.** Електроакустичний тракт детектора для виявлення малих безпілотних літальних апаратів ..... 135
- Кичак В. М., Ковальчук М. Б., Макогон О. С., Мельничук О. М.** Застосування частотно-імпульсних сигналів для синтезу завадостійких цифрових радіотехнічних пристроїв..... 145

# CONTENTS

Issue DOI <https://doi.org/10.31649/1997-9266-2023-167-2>

## ECOLOGY AND ENVIRONMENTAL SECURITY

- Ranskyi A., Korinenko B.** Alternative Energy: Obtaining Synthetic Oil During the Pyrolysis Processing of Polypropylene Waste ..... 6
- Krykhovets O., Slobodianyk V.** Research of Polyvinyl Alcohol-Based Films as Environmentally Friendly Flexible Packaging ..... 15
- Xiaodong S., Ishchenko V.** Waste Lithium-Ion Batteries Management in China ..... 21

## ENERGY GENERATION, ELECTRIC ENGINEERING AND ELECTROMECHANICS

- Tkachenko S., Vlasenko O.** Non-Stationary Heat Exchange — Determination of the Heat Transfer Coefficient Using Stationary Methods and Regular Thermal Mode Methods ..... 28
- Stepanov D., Rezydent N.** Efficiency of Gas-Piston Cogeneration Facilities in the Systems of Centralized Heat Supply ..... 36

## INFORMATION TECHNOLOGIES AND COMPUTER ENGINEERING

- Mokin B., Mokin O., Shalagai D.** The First Two Stages of the Systemic Analysis of the Plan for the Reconstruction of Ukraine's Energy Sector Towards Integration of Renewable Sources..... 42
- Shtovba S., Petrychko M., Petranova M.** A Similarity Metric of Categorical Distributions that Accounts for the Kinship of Different Categories..... 49
- Kryzhanovskiy V.** Entropy and Quantity of Information in Technical Designations..... 58
- Zditovetskyi Yu., Bisikalo O., Ivanov Yu.** Intellectual Information System for Recognition and Food Product Composition Analysis ..... 66
- Redko I., Zylevich M.** Theoretical Foundations of Software Relativization in Technological Programming Systems ..... 72
- Romanyuk O., Melnyk O., Shmalyukh V.** Method of Accelerated Circular Interpolation on a Hexagonal Grid..... 81
- Karpinets V., Kataiev V., Pavlovskii P., Geresh D.** Device of Protection of Analog Telephone Communication Based on Scrambler with Change of Wavelet Conversion Coefficients ..... 89
- Zhdanova O., Kovalenko V.** Problem of Scheduling Jobs Considering Time Windows ..... 97
- Saliieva O., Zoria I., Bondarenko I., Berestenko M.** Increasing the Reliability of User Authentication Based on Protected Electronic Key and Behavioral Biometrics..... 102

## MECHANICAL ENGINEERING AND TRANSPORT

- Savuliak V., Dmytriiev M., Shenfeld V., Sharhorodskiy K.** Functional Coatings, Deposited Using Flexible Electrode Tapes ..... 112
- Smolin Yu.** Method for Selecting the Discretization Step of Indicator Diagrams in Digital Methods of Internal Combustion Engines Parameters Monitoring ..... 119

## RADIOELECTRONICS AND RADIOELECTRONIC EQUIPMENT MANUFACTURING

- Bilynskiy Yo., Skaletska M.** Analysis of Methods and Means for Measuring the Humidity of Bulk Products..... 125
- Sokolskyi S., Movchanyuk A.** Electro-Acoustic Path of the Detector for Detection of Small Unmanned Aerial Vehicles ..... 135
- Kychak V., Kovalchuk M., Makogon O., Melnytchuk O.** Application of Frequency-Pulse Signals for the Synthesis of Interference-Free Digital Radio Devices..... 145

## АЛЬТЕРНАТИВНА ЕНЕРГЕТИКА: ОТРИМАННЯ СИНТЕЗ-НАФТИ В ПРОЦЕСІ ПІРОЛІЗНОЇ ПЕРЕРОБКИ ПОЛІПРОПІЛЕНОВИХ ВІДХОДІВ

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

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

*Показана та обґрунтована доцільність переробки полімерних відходів, зокрема поліпропіленових, методом низькотемпературного піролізу з метою отримання альтернативних/відновлювальних джерел енергії: синтез-нафти/піролізної рідини, піролізних газів та пірокарбону. Досліджена термодеструкція відходів поліпропілену на технологічній установці періодичної дії за відсутності кисню повітря та кислотних каталізаторів. Показано, що проведення низькотемпературного піролізу відходів поліпропілену в температурному інтервалі 250...412 °C протягом 3,5 годин забезпечує вихід основного продукту, а саме синтез-нафти 78,5 % мас., газової суміші 13,6 % мас. та пірокарбону 5,1 % мас. Результати проведених досліджень дозволяють стверджувати, що температура в зоні піролізу полімерних відходів має визначальний характер як на співвідношення основних продуктів процесу — піролізна рідина : газова суміш : пірокарбон, так і на хімічний склад перших двох складових. Фракційною перегонкою синтез-нафти отримані бензинова (28,8 % об.), лігроїнова (12,4 % об.), керосинова (16,0 % об.) та дизельна (23,6 % об.) фракції. Методом газової хроматографії проведено їхній якісний та кількісний аналіз. Встановлено, що переважна більшість сполук у різних фракціях є насиченими вуглеводнями нормальної та ізомерної будови: для бензинової фракції насичені вуглеводні складають 77,86 % мас., для лігроїнової — 84,15 % мас., для керосинової — 78,92 %, для дизельної — 60,82 % мас. На основі отриманих результатів досліджень запропоновано загальну схему термічної деструкції відходів поліпропілену з отриманням насичених та ненасичених (C<sub>6</sub> – C<sub>13</sub>) рідких вуглеводнів, насичених та ненасичених (C<sub>1</sub> – C<sub>5</sub>) газоподібних вуглеводнів, водню та пірокарбону. Незначна частина алкенів (C<sub>6</sub> – C<sub>13</sub>) може підлягати циклізації або ароматизації з утворенням нафтенів (C<sub>6</sub> – C<sub>13</sub>) або аренів (C<sub>8</sub> – C<sub>9</sub>).*

**Ключові слова:** синтез-нафта, піролізна рідина, низькотемпературний піроліз, полімерні відходи, поліпропілен, хроматографічний аналіз.

### Вступ і постановка задачі

Накопичення пластикових відходів у світі є глобальною проблемою, вирішення якої дозволить не лише економити викопні/невідновлювані джерела енергії (нафту, газ, вугілля), покращувати екологічний стан довкілля, а і зменшувати рівень потенційної загрози для здоров'я людини. При цьому використання низькотемпературного піролізу в процесі переробки пластикових відходів дозволяє отримати альтернативні джерела енергії (синтез-нафту, піролізний газ, пірокарбон) та іншу хімічну сировину. Великий світовий попит на викопні джерела енергії визначає значне коливання цін, наприклад, на бензин та дизельне паливо, що зокрема значно впливає на економіку багатьох країн, включно з Україною. В цьому контексті полімерні відходи необхідно розглядати як перспективне відновлювальне джерело енергії, а сам процес низькотемпературного піролізу [1]— [3] в рамках циркулярної економіки [4] як вагомий альтернативу найпоширенішому на сьогодні спалюванню пластика. При цьому, переважна більшість дослідників низькотемпературного піролізу за полімерних відходів (поліетилену високого тиску (ПЕВТ), поліетилену низького тиску (ПЕНТ), поліпропілену (ПП), полістиролу) намагається отримати синтез-нафту/піролізну рідину з максимально високим виходом. Необхідно зазначити, що термодеструкція полімерних відходів досліджена в багатьох наукових роботах, проте вона як і раніше залишається важливим об'єктом прик-

ладних досліджень отримання синтез-нафти [5]—[10]. При цьому отримують піролізну рідину, яка за своїми властивостями, залежно від температури переробки, подібна до дизельного палива або керосину [5], [6]. Основні принципи низькотемпературного піролізу пластикових відходів визначені Джоші та Сейом в роботах [11]—[15], однак практична їхня переробка ускладнюється відсутністю надійної їхньої ідентифікації, необхідністю сортування та переробки, зазвичай суміші пластику невідомого походження.

Це, у свою чергу, визначило низку завдань з оптимізації технології піролізної переробки полімерних відходів з урахуванням не лише складу полімерних відходів, а і температурного режиму, часу, використання каталізаторів та апаратного оформлення процесу.

*Мета роботи* — дослідити термохімічну деструкцію відходів поліпропілену та розглянути можливість практичного використання продуктів піролізу як альтернативних видів палива.

### Експериментальна частина

Досліджувані відходи поліпропілену (ПП) утворились після їх використання як упаковки промислових та продовольчих товарів у м. Вінниці. Суху та однорідну поліпропіленову плівку, за необхідності, подрібнювали до приблизного розміру  $50 \times 50$  см з метою щільного її пакування в реактор піролізної установки. Експериментальне дослідження термодеструкції ПП проводили в реакторі періодичної дії за відсутності кисню повітря та каталізатора на установці, принципова схема якої показана на рис. 1.

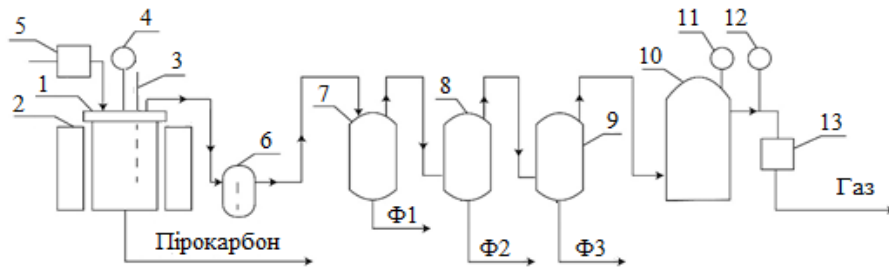


Рис. 1. Принципова технологічна схема дослідно-промислової установки піролізу полімерних відходів: 1 — реактор піролізу; 2 — електронагрівальна піч; 3 — хромельялюмомелева термопара; 4, 11 — манометри; 5 — дозатор пластикових відходів; 6 — гідрозатвір; 7, 8 — теплообмінники-конденсатори; 9 — конденсатор-газовіддільвач; 10 — газгольдер; 12 — газовий лічильник; 13 — компресор; Ф-1—Ф-3 — фракції

Загальна методика термодеструкції поліпропілену. Подрібнений ПП зважували (11,8 кг) та щільно пакували у реактор, прокладали для герметизації по периметру промаслений азбестовий джгут та приєднували кришку реактора болтами до основного корпусу, а фланцеве з'єднання — до системи конденсації парогазової суміші. Температура процесу регулювалась автоматично блоком регулювання температури послідовного нагрівання трьох електротенів, вмонтованих в термоізолювальний корпус нагрівача. Надлишковий тиск в реакторі та системі в цілому регулювався відповідно манометрами п. 4 та п. 11 (рис. 1).

Для кількісного і якісного аналізу отриманої піролізної рідини та можливого її практичного використання як альтернативного палива для двигунів внутрішнього згоряння (ДВЗ) проводили її фракційну перегонку на лабораторній установці, показаній на рис. 2.

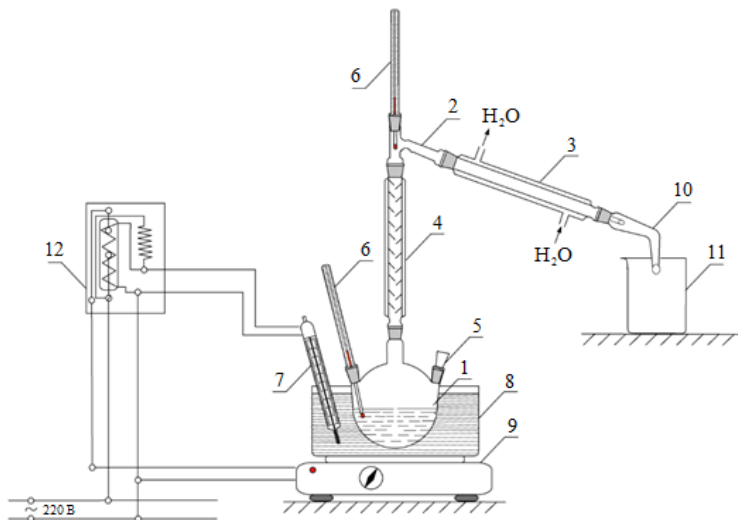


Рис. 2. Лабораторна установка фракційної перегонки піролізної рідини: 1 — реактор; 2 — насадка Вюрца; 3 — прямий холодильний Лібиха; 4 — колонка для фракціонування; 5 — пробка; 6 — ртутний термометр; 7 — контактний термометр для автоматичного підтримання температури в реакторі 1; 8 — піщана баня; 9 — електронагрівач; 10 — алонж; 11 — приймач; 12 — електричне реле

Загальна методика проведення перегонки. В реактор 1 завантажували 250 см<sup>3</sup> ( $\rho = 0,851 \text{ г/см}^3$ ) піролізної рідини термодеструкції ПП, установлювали на контактному термометрі 7 температуру 150 °С, яку підтримували в автоматичному режимі за допомогою електричного реле 12. Вмикали електронагрівач 9 і в першому температурному інтервалі 40...140 °С відбирали фракцію, яка відповідає бензиновій. Аналогічно відбирали і інші фракції, збільшуючи температурний інтервал нагрівання. Отримані дані фракційної перегонки піролізної рідини термодеструкції ПП подані у табл. 1.

Таблиця 1

**Результати фракційної перегонки піролізної рідини термодеструкції відходів поліпропілену**

| Фракція*        | Температурний інтервал, °С | Характеристика дистилляту |        |                            |              |
|-----------------|----------------------------|---------------------------|--------|----------------------------|--------------|
|                 |                            | V, см <sup>3</sup>        | m, г   | $\rho$ , г/см <sup>3</sup> | Вихід, % об. |
| бензинова       | 40...140                   | 72,0                      | 55,8   | 0,775                      | 28,80        |
| лігроїнова      | 140...180                  | 31,0                      | 25,14  | 0,811                      | 12,40        |
| керосинова      | 180...240                  | 40,0                      | 33,40  | 0,835                      | 16,00        |
| дизельна        | 240...350                  | 59,0                      | 50,91  | 0,863                      | 23,60        |
| мазут           | > 350                      | 42,3                      | 39,00  | 0,926                      | 16,92        |
| втрати          | —                          | —                         | 5,32   | —                          | 2,50**       |
| залишок у колбі | —                          | —                         | 3,19   | —                          | 1,50**       |
| Всього          | —                          | —                         | 212,75 | —                          | —            |

*Примітки:* \* — згідно з [16] бензинову фракцію відбирали в температурному інтервалі 40...140 °С, лігроїнову 140...180 °С, керосинову 180...240 °С, дизельну 240...350 °С, мазут > 350 °С; \*\* — % мас.

Хроматографічний аналіз отриманих рідких фракцій піролізної переробки відходів ПП (табл. 1) проводили з використанням газового хроматографа «Agilent Technologies 7890 A» (Компанія Agilent Technologies, США) з полум'яно-іонізаційним детектором з використанням кварцової капілярної колонки довжиною 60 м, внутрішнім діаметром 0,320 мм з середньополярною ціанопротилметилсилоконовою (6 % ціанопротил-, 94 % метилполісилоксан) нерухою фазою DB-624 UI (товщина шару 1,8 мкм) в режимі програмування температури. Проби об'ємом 0,4...0,6 мкл вводились в колонку мікрошприцем ємністю 10,0 мкл. Фракції з різними температурними інтервалами аналізувались за різних температурних режимів. Умови газохроматографічного аналізу наведено в табл. 2.

Таблиця 2

**Умови проведення хроматографічного аналізу рідких фракцій піролізу на хроматографі «Agilent Technologies 7890 A»**

| Параметри аналізу                                  | Діапазон температур кипіння фракцій                      |   |
|--|--|---|
|  | 40...215 °С  | 215...360 °С  |
|  | Показник   |   |
| Температура колонки, °С                            | 70 °С — 5 хв; 70...260 °С — нагрів 7°/хв; 260 °С — 20 хв | 210 °С — 40 хв; 210...260 °С нагрів 5°/хв; 260 °С — 30 хв |
| Температура випарника, °С                          | 250  | 270   |
| Температура детектора, °С                          | 250  |   |
| Газ-носії  | Гелій  |   |
| Витрати газу-носія (He), см <sup>3</sup> /хв       | 2,054  | 1,156   |
| Витрати допоміжного газу (He), см <sup>3</sup> /хв | 25,0   |   |
| Розподіл потоку He (потік / скид)                  | 1 / 100  | 1 / 150   |
| Витрати водню, см <sup>3</sup> /хв                 | 30   |   |
| Витрати повітря, см <sup>3</sup> /хв               | 350  |   |

Обробку результатів аналітичних досліджень проводили з використанням аналітичної програми Chem Station.

**Результати досліджень**

Синтез-нафту/піролізну рідину отримували термодеструкцією відходів ПП в реакторі періодичної дії в температурному інтервалі 250...412 °С протягом 3,5 год. Надлишковий тиск при цьому в реакторі та технологічній системі складав 0,20...0,25 атм. (див. рис. 1). Необхідно зазначити, що сталевий реактор (Ст. 5,  $V = 150 \text{ дм}^3$ ) нагрівався в електронагрівальній печі за допомогою 220 вольтових нагрівальних тенів. Температуру процесу та надлишковий тиск в реакторі термодеструкції пластику контролювали за допомогою відповідно блока регулювання температури (типу ОВЕН УКТ38 — вимірювач 8-канальний з аварійною сигналізацією), термопари (ТЕРА ТХА 1-3) та ма-



нометра (ДМ 05100, радіальний, 0...250 мПа, кл. 1.0). Швидкість нагрівання, зазвичай, визначалась типом полімерної суміші, що підлягала термічній переробці. Кількість електричної енергії, витраченої на нагрівання, визначалась показниками лічильника (трифазного індукційного однотарифного електролічильника СА4-І678), а кількість утвореної газової суміші — мембранним газовим лічильником (Metrix UG6). Парогазова суміш продуктів термолізу полімерних відходів конденсувалась послідовно у теплообміннику-конденсаторі п. 7 (рис. 1, Ф-1 — важка фракція, зазвичай темно коричневого кольору), теплообміннику-конденсаторі п. 8 (рис. 1, Ф-2 — середня фракція, зазвичай коричневого або світло-коричневого кольору) та конденсаторі-газовідділювачі п. 9 (рис. 1, Ф-3 — легка фракція жовтого кольору), склад яких підлягав хроматографічному контролю (хроматограф «Agilent Technologies 7890 А», США). Після кожного досліду реактор охолоджувався до температури 30...35 °С, від'єднувалась кришка, а пірокарбон, що утворився, вивантажувався ручним способом та зважувався на технічних електронних вагах ВТА-60/15-73 (ТОВ «Компанія Уніпро», Україна). Наведені дані матеріального балансу термодеструкції відходів ПП (табл. 3) вказують на те, що утворення синтез-нафти складає 78,49 % мас., газової суміші 13,56 % мас., а пірокарбону лише 5,08 % мас. Аналіз літературних даних термодеструкції ПП за температури 500 °С вказує на вихід піролізної рідини 95 % мас. [17], тоді як згідно з результатами досліджень термодеструкції ПП в інтервалі температур 350...375 °С відсоток продуктів рідкої фракції, за даними роботи [18], становив лише 50 %.

Таблиця 3

Матеріальний баланс термодеструкції відходів поліпропілену

| Завантажено               |          |                  | Отримано             |          |                        |                  |
|---------------------------|----------|------------------|----------------------|----------|------------------------|------------------|
| Найменування              | Маса, кг | Масова частка, % | Найменування         | Маса, кг | Об'єм, дм <sup>3</sup> | Масова частка, % |
| 1. Відходи поліпропілену: | 11,80    | 100,0            | 1. Піролізна рідина: | 9,55     | 11,17                  | 80,93            |
| поліпропілен              | 11,50    | 97,46            | синтез-нафта*        | 9,25     | 10,87                  | 78,49            |
| вода                      | 0,30     | 2,54             | вода                 | 0,30     | 0,30                   | 2,54             |
| —                         | —        | —                | 2. Газова суміш**    | 1,60     | 2240                   | 13,56            |
| —                         | —        | —                | 3. Пірокарбон        | 0,60     | —                      | 5,08             |
| —                         | —        | —                | 4. Втрати            | 0,05     | —                      | 0,42             |
| Всього                    | 11,80    | 100,0            | Всього               | 11,80    | —                      | 100,0            |

Примітки: \* — густина для синтез-нафти  $\rho = 0,851 \text{ г/см}^3$ ; \*\* — для газової суміші  $\rho = 0,71 \text{ кг/м}^3$ .

Очевидно, що така розбіжність в отриманих результатах може залежати від швидкості нагрівання полімерної суміші, що в кінцевому варіанті визначає час проведення термодеструкції та механізм проходження відповідних реакцій в зоні піролізу. Результати проведених досліджень показали, що температура в зоні піролізу полімерних відходів має визначальний характер не лише на співвідношення основних продуктів процесу — піролізна рідина : газова суміш : пірокарбон, а і на хімічний склад перших двох складових. Так, на рис. 3 показано, що визначальна частина піролізної рідини у випадку переробки ПП утворюється в температурному інтервалі 250...412 °С та складає 78,5 % мас. від загальної кількості отриманих продуктів піролізу (див. табл. 3). Залежність виходу піролізної рідини від часу процесу показано на рис. 4.

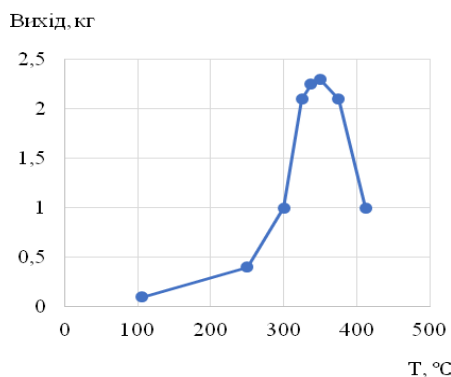


Рис. 3 Залежність виходу піролізної рідини термодеструкції відходів поліпропілену від температури

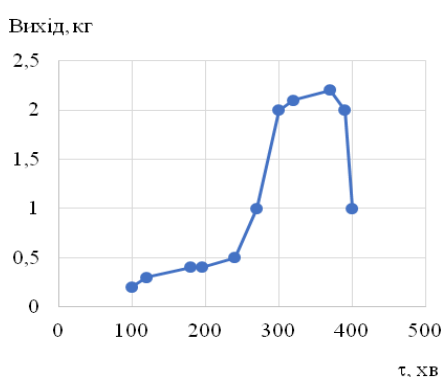


Рис. 4 Залежність виходу піролізної рідини термодеструкції відходів поліпропілену від часу

Отримані результати вказують на те, що перший етап піролізу ПП пов'язаний з нагріванням ре-

актора ( $\sim 100\dots 110$  хв) та відгонкою супутньої води ( $\sim 300$  см<sup>3</sup>) за температури 100 °С, дані наведені відповідно на рис. 3 та рис. 4. Подальша термодеструкція ПП, що пов'язана з утворенням вуглеводнів зі значно меншою молекулярною масою, проходить за 3,5 год. При цьому конденсація піролізної рідини в часі проходить нерівномірно. Основний об'єм піролізної рідини конденсується в інтервалі 270...400 хв термодеструкції полімерних відходів із поліпропілену.

Для визначення хімічного складу піролізної рідини (синтез-нафти) використовували хроматографічний метод; отримані хроматограми бензинової, лігроїнової, керосинової та дизельної фракцій наведені відповідно на рис. 5, 6, 7 та 8.

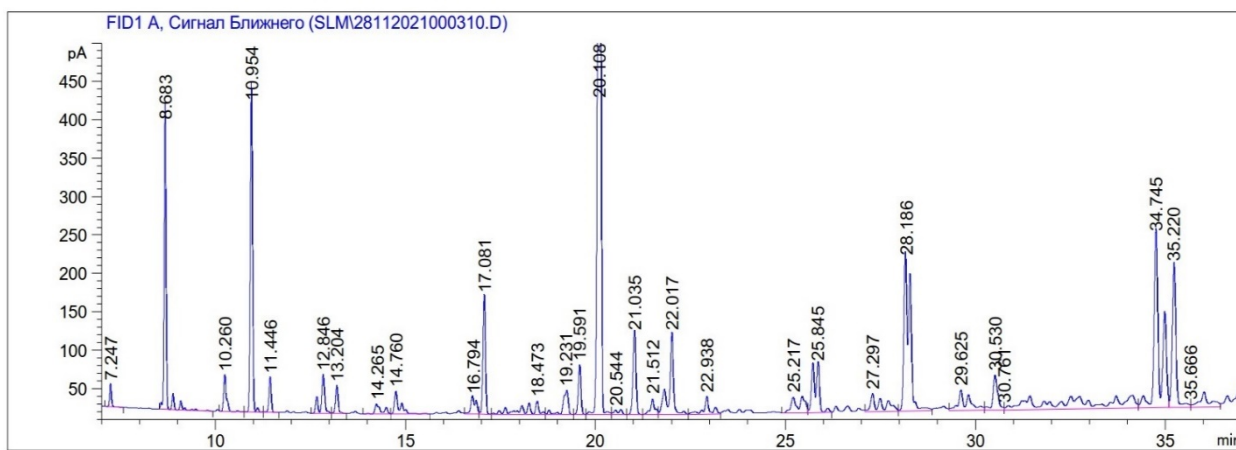


Рис. 5. Хроматограма бензинової фракції піролізної переробки відходів поліпропілену

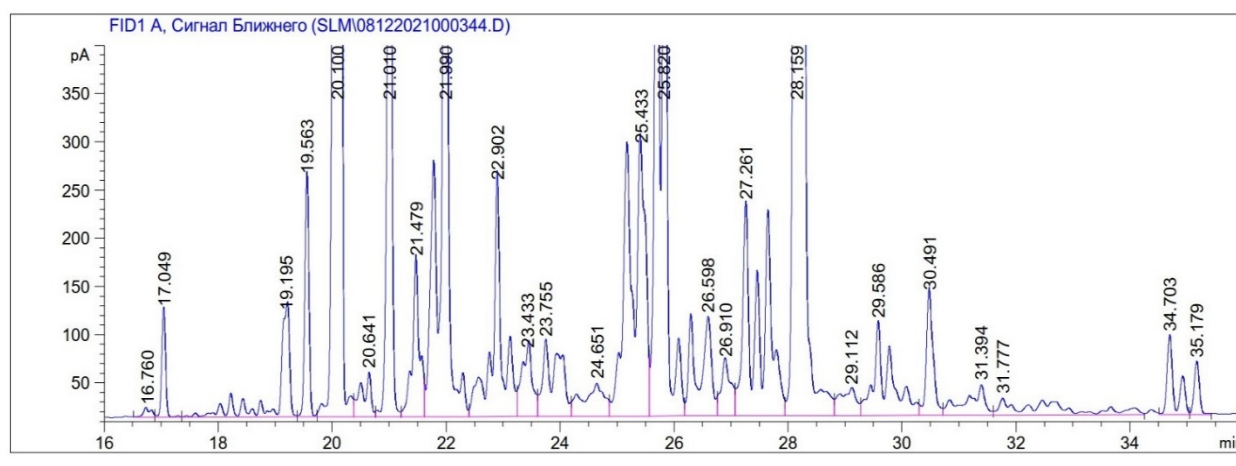


Рис. 6. Хроматограма лігроїнової фракції піролізної переробки відходів поліпропілену

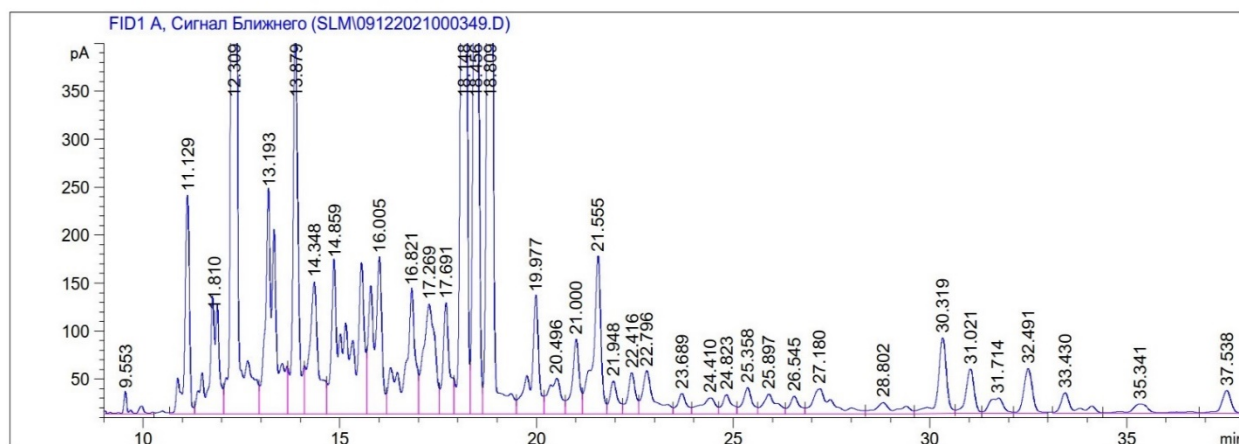


Рис. 7. Хроматограма керосинової фракції піролізної переробки відходів поліпропілену

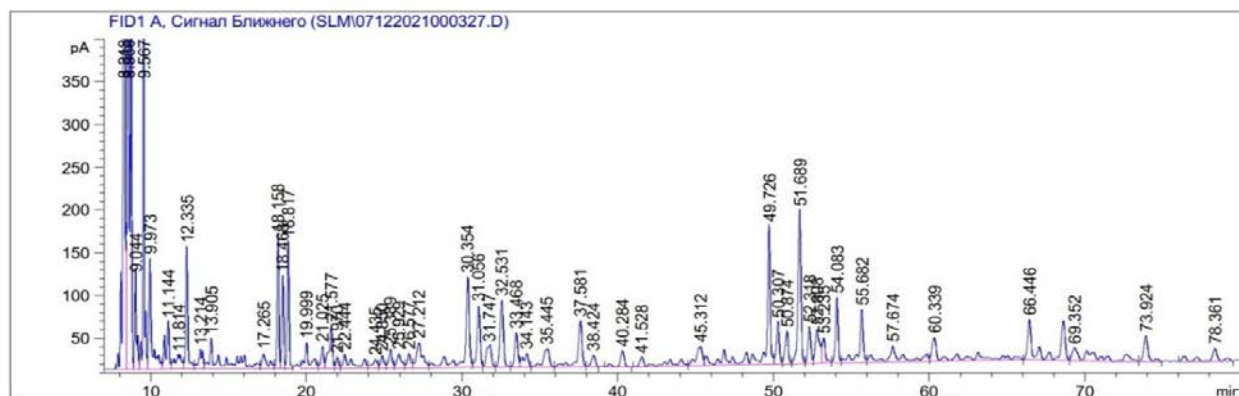


Рис. 8. Хромотограма дизельної фракції піролізної переробки відходів поліпропілену

Ідентифікацію хромотографічних піків (див. рис. 5—8) проводили з урахуванням лінійних індексів утримання індивідуальних хімічних сполук, база даних яких знаходилась в аналітичній програмі Chem Station, використанням деяких еталонних сполук для ідентифікації невідомих піків, а також з урахуванням отриманих результатів оригінальних робіт низькотемпературного піролізу поліпропілену або його сумішей з іншими видами полімерних відходів в температурному інтервалі 350...400 °С [18]. При цьому необхідно зазначити, якщо хімічний склад природної нафти в першому наближенні залежить від місцезнаходження природного родовища, то хімічний склад піролізної рідини (синтез-нафти) — від природи та складу полімерних відходів. В табл. 4 подано хімічний склад різних фракцій піролізної рідини термодеструкції ПП, отриманих після її фракційної перегонки. За хімічним складом переважна кількість сполук у різних фракціях є насиченими вуглеводнями нормальної та ізомерної будови. Для бензинової фракції насичені вуглеводні становлять 77,86%, для лігроїнової — 84,15%, для керосинової — 78,92%, а для дизельної — лише 60,82% від загальної маси. Однак, що стосується індивідуальних хімічних сполук, ця кількість передбачувано і суттєво відрізняється. У бензиновій фракції 47,81% припадає на вуглеводні  $C_6 - C_9$ ; у лігроїнової 84,15% — на вуглеводні  $C_9 - C_{12}$ ; у керосиновій 73,08% — на вуглеводні  $C_{11} - C_{13}$  нормальної та ізомерної будови і лише 43,94% становлять насичені вуглеводні  $C_6 - C_{10}$  для дизельної фракції.

Таблиця 4

Склад рідких продуктів термодеструкції поліпропілену

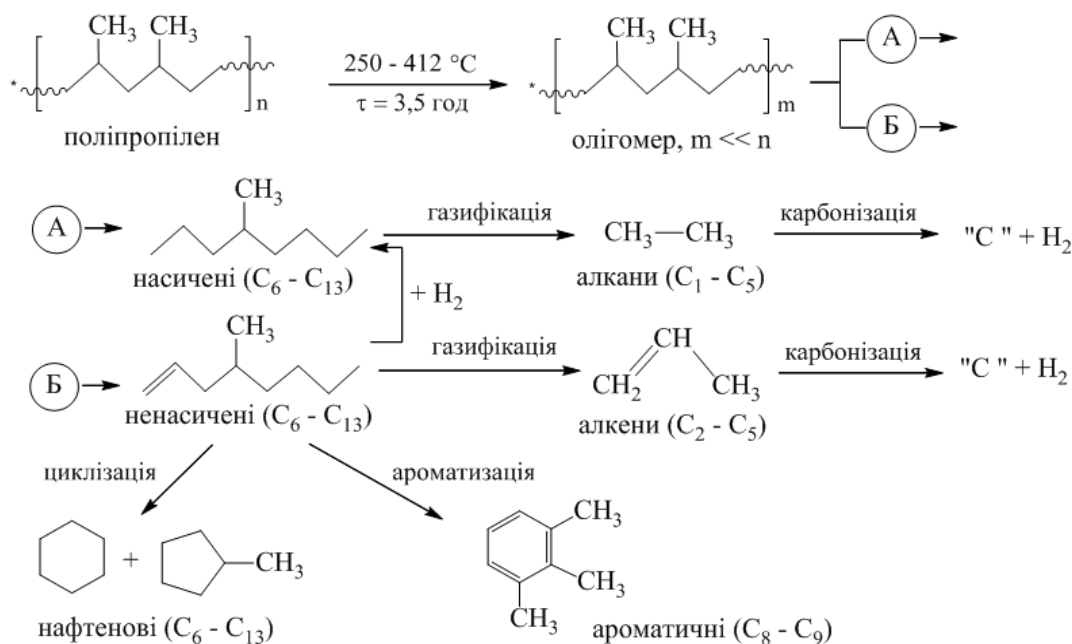
| Вуглеводні*         | Фракція піролізної рідини, % мас. |                           |                           |            |
|---------------------|-----------------------------------|---------------------------|---------------------------|------------|
|                     | бензинова (40...140 °С)           | лігроїнова (140...180 °С) | керосинова (180...240 °С) | дизельна** |
| н- $C_6H_{14}$      | 5,25                              | —                         | —                         | 18,64      |
| ізо- $C_6H_{14}$    | 6,03                              | —                         | —                         | —          |
| $C_7H_{16}$         | 2,47                              | —                         | —                         | 16,55      |
| $C_8H_{18}$         | 1,24                              | —                         | —                         | 4,07       |
| н- $C_9H_{20}$      | 29,90                             | 39,14                     | —                         | 2,41       |
| ізо- $C_9H_{20}$    | 2,92                              | ∑ 11,47                   | —                         | —          |
| н- $C_{10}H_{22}$   | 1,32                              | 2,63                      | 2,07                      | 2,27       |
| ізо- $C_{10}H_{22}$ | —                                 | 5,07                      | —                         | —          |
| н- $C_{11}H_{20}$   | 2,46                              | 8,26                      | 15,86                     | —          |
| ізо- $C_{11}H_{20}$ | 7,61                              | 3,99                      | 4,23                      | —          |
| н- $C_{12}H_{26}$   | 5,71                              | 13,59                     | 3,91                      | —          |
| ізо- $C_{12}H_{26}$ | —                                 | —                         | ∑ 10,57                   | —          |
| н- $C_{13}H_{28}$   | 8,49                              | —                         | 2,46                      | —          |
| ізо- $C_{13}H_{28}$ | —                                 | —                         | ∑ 36,05                   | —          |
| н- $C_{14}H_{30}$   | 4,46                              | —                         | 2,42                      | 1,09       |
| ізо- $C_{14}H_{30}$ | —                                 | —                         | —                         | —          |
| н- $C_{15}H_{32}$   | —                                 | —                         | 0,95                      | 1,10       |
| ізо- $C_{15}H_{32}$ | —                                 | —                         | —                         | 3,01       |
| н- $C_{16}H_{34}$   | —                                 | —                         | 0,40                      | 0,89       |
| н- $C_{17}H_{36}$   | —                                 | —                         | —                         | 4,57       |
| н- $C_{18}H_{38}$   | —                                 | —                         | —                         | 3,41       |
| н- $C_{19}H_{40}$   | —                                 | —                         | —                         | 2,81       |

Примітки: \* — враховувалися лише піки хімічних сполук, частина яких у загальній площі перевершувала 2%; \*\* — фракція, отримана під час перегонки за ГОСТ 2177-99.

Інші вуглеводні (олефінові, нафтенові, ароматичні) становлять різницю між ста відсотками та наведеними раніше значеннями щодо вуглеводнів насиченого ряду нормальної та ізомерної будови. Отримані авторами результати досліджень щодо хімічного складу піролізної рідини термодеструкції поліпропілену або його сумішей з іншими полімерними відходами підтверджуються даними, отриманими в низці інших робіт [18], [19].

В роботах [19]—[22] досліджувалась можливість використання рідкої фракції переробки полімерних відходів, включно з ПП, як синтетичних бензинів (фракція вуглеводнів  $C_6 - C_{12}$ ) або дизельних палив/керосинів (фракція вуглеводнів  $C_{12} - C_{20}$ ). При цьому температурний інтервал піролізу переробки пластику становив  $350 \dots 400 \text{ }^\circ\text{C}$ , що збігається з температурним діапазоном термодеструкції ПП  $250 \dots 412 \text{ }^\circ\text{C}$  (табл. 3), який використовувався у наших дослідженнях. Тобто, отримані дані вказують на можливість та економічну доцільність використання бензинових та дизельних фракцій піролізної рідини термічної переробки відходів поліпропілену як складових альтернативного палива для ДВЗ. Крім того, в роботі [23] встановлено, що газ, який виділяється в процесі термічної деструкції ПП, ПЕНТ, ПЕВТ складається переважно з легких алканів ( $CH_4$ ,  $C_2H_6$ ,  $C_3H_8$ ), алкенів ( $C_2H_4$ ,  $C_3H_6$ ), водню  $H_2$  та оксидів карбону  $CO$  та  $CO_2$ . Теплота згоряння газової суміші складає  $48,6 \dots 49,2 \text{ кДж/кг}$  і практично збігається з теплою згоряння дизельного палива  $45,6 \text{ кДж/кг}$ . В роботі [24], досліджуючи піроліз ПЕНТ, ПЕВТ, ПП, встановлено, що до газової суміші, окрім вуглеводнів  $C_1 - C_3$ , входять у незначній кількості ( $< 2,0 \%$ ) вуглеводні  $C_4 - C_5$ . Тобто, піролізні гази можна ефективно використовувати як альтернативне джерело енергії. В роботі [3] досліджено та показано ефективне використання пірокарбону під час виготовлення паливних брикетів. Це дозволяє стверджувати, що термохімічна переробка відходів поліпропілену дозволяє отримати альтернативні джерела енергії: синтетичну нафту, піролізний газ та пірокарбон.

Отримані результати з термодеструкції ПП, а також дані інших робіт [25] дозволяють подати досліджені хімічні перетворення такою загальною схемою:



Початкова термодеструкція ПП супроводжується утворенням олігомерів зі значно меншою молекулярною масою, а подальше їхнє  $\beta$ -розщеплення, вочевидь, за радикальним механізмом — до насичених та ненасичених вуглеводнів  $C_6 - C_{13}$ . Останні підлягають послідовній газифікації (алкани, алкени —  $C_1 - C_5$ ) та карбонізації з утворенням пірокарбону та водню. Незначна частина алкенів ( $C_6 - C_{13}$ ) може підлягати циклізації або ароматизації з утворенням відповідно нафтенів ( $C_6 - C_{13}$ ) або аренів ( $C_8 - C_9$ ).

## Висновки

1. Обґрунтована доцільність переробки відходів поліпропілену методом низькотемпературного піролізу з отриманням альтернативних енергетичних складових: синтез-нафти, газової складової та пірокарбону. Запропоновані галузі ефективного їхнього використання.

2. Розроблено технологію піролізної переробки полімерних відходів з максимальним виходом піролізної рідини/синтез-нафти.

3. Встановлено, що проведення низькотемпературного піролізу полімерних відходів в температурному діапазоні 250...412 °C протягом 3,5 годин забезпечує вихід синтез-нафти 78,5 % мас. від загальної маси продуктів термохімічних перетворень.

4. З урахуванням результатів дослідження термодеструкції відходів поліпропілену запропонована загальна схема з отриманням насичених та ненасичених (C<sub>6</sub> – C<sub>13</sub>) рідких вуглеводнів, насичених та ненасичених (C<sub>1</sub> – C<sub>5</sub>) газоподібних вуглеводнів, водню H<sub>2</sub>, оксидів карбону CO та CO<sub>2</sub> та твердого пірокарбону.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- [1] L. M. Heidbreder, I. Bablok, S. Drews, and C. Menzel, "Tackling the plastic problem: A review on perceptions, behaviors, and interventions," *Science of the total environment*, vol. 668, pp. 1077-1093, Jun. 10, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.02.437> .
- [2] D. J. Lee, J. S. Lu, and J. S. Chang, "Pyrolysis synergy of municipal solid waste (MSW): A review," *Bioresource Technology*, vol. 318, pp. 123912, Dec. 2020. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2020.123912> .
- [3] А. П. Ранський, Б. В. Коріненко, О. А. Гордієнко, і Є. О. Євдокименко, «Альтернативна енергетика: отримання паливних брикетів із пірокарбону термодеструкції полімерних відходів», *Вісник Вінницького політехнічного університету*, № 1, с.13-20, 2023. <https://doi.org/10.31649/1997-9266-2023-166-1-13-20> .
- [4] Б. В. Коріненко, О. С. Худоярова, К. Ю. Гура, і А. П. Ранський, «Циркулярна економіка та термохімічна конверсія твердих відходів», *Вісник Вінницького політехнічного інституту*, № 4, с. 7-19, Серп. 31. 2021. <https://doi.org/10.31649/1997-9266-2021-157-4-7-19> .
- [5] D. DeNeve, C. Joshi, J. Higgins, and J. Seay, "Optimization of an Appropriate Technology Based Process for Converting Waste Plastic in to Liquid Fuel via Thermal Decomposition," *Journal of Sustainable Development*, vol. 10, iss. 2, pp. 116, 2017. <https://doi.org/10.5539/jsd.v10n2p116> .
- [6] S. Kumar, and R. K. Singh, "Recovery of Hydrocarbon Liquid from Waste High Density Polyethylene by Thermal Pyrolysis," *Braz. J. Chem. Eng.*, vol. 28, pp. 659-667, 2011. <https://doi.org/10.1590/S0104-66322011000400011> .
- [7] A. K. Panda, R. K. Singh, and D. K. Mishra, "Thermolysis of Waste Plastics to Liquid Fuel. A Suitable Method for Plastic Waste Management and Manufacture of Value Added Products — A World Prospective," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 14, iss. 1, pp. 233-248, Jan. 2010. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2009.07.005> .
- [8] L. Patil, A. K. Varma, G. Singh, and P. Mondal, "Thermocatalytic Degradation of High Density Polyethylene into Liquid Product," *J. Polym. Environ.*, vol. 26, pp. 1920-1929, Jun. 29, 2017.
- [9] C. Santaweek, and A. Janyalertadun, "The Production of Fuel Oil by Conventional Slow Pyrolysis Using Plastic Waste from a Municipal Landfill," *Int. J. Environ. Sci. Dev.*, vol. 8, no. 3, pp. 168-173, Mar. 2017. <https://doi.org/10.18178/ijesd.2017.8.3.941>.
- [10] S. I. Wong, N. Ngadia, T. A. T. Abdullah, and I. M. Inuwac, "Current State and Future Prospects of Plastic Waste as Source of Fuel: A Review," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 50, pp. 1167-1180, Oct. 2015. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.04.063>.
- [11] C. A. Joshi, and J. R. Seay, "An appropriate technology based solution to convert waste plastic into fuel oil in underdeveloped regions", *Journal of Sustainable Development*, vol. 9, no. 4, pp. 133-143, Jul. 20. 2016. <https://doi.org/10.5539/jsd.v9n4p133> .
- [12] C. Joshi, and J. Seay, "Building momentum for sustainable behaviors in developing regions using Locally Managed Decentralized Circular Economy principles," *Chinese Journal of Chemical Engineering*, vol. 27, iss. 7, pp. 1566-1571, Jul. 2019. <https://doi.org/10.1016/j.cjche.2019.01.032> .
- [13] C. A. Joshi, and J. R. Seay, "Total generation and combustion emissions of plastic derived fuels: A trash to tank approach," *Environ. Prog. Sustain. Energy*, vol. 39, iss. 5, Jan. 18. 2019. <https://doi.org/10.1002/ep.13151> .
- [14] C. Joshi, J. Seay, and N. Banadda, "A Perspective on a Locally Managed Decentralized Circular Economy for Waste Plastic in Developing Countries," *Environ. Prog. Sustain. Energy*, vol. 38, pp. 3-11, Dec. 2019. <https://doi.org/10.1002/ep.13086>.
- [15] C. Joshi, S. Browning, and J. Seay, "Combating plastic waste via Trash to Tank," *Nat. Rev. Earth Environ.*, vol. 1, p. 142, Feb. 17. 2020. <https://doi.org/10.1038/s43017-020-0032-3> .
- [16] А. П. Ранський, *Органічна хімія і екологія. Теоретичні основи органічної хімії. Аліфатичні вуглеводні*, навч. пос. Вінниця, Україна: ВНТУ, 2012.
- [17] P. T. Williams, and E. Slaney, "Analysis of products from the pyrolysis and liquefaction of single plastics and waste plastic mixtures," *Resources, Conservation & Recyclibg.*, vol. 51, iss. 4, pp. 754-769, Oct. 2007. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2006.12.002> .
- [18] P. Palmay, C. Haro, I. Huacho, D. Barzallo, and J. C. Bruno, "Production and analysis of the physicochemical properties of the pyrolytic oil obtained from pyrolysis of different thermoplastics and plastic mixtures," *Molecules*, vol. 27, iss. 10, p. 3287, May 20. 2022. <https://doi.org/10.3390/molecules27103287> .
- [19] D. S. Achilias, C. Roupakias, P. Megalokonomosa, A. A. Lappas, and E. V. Antonakou, "Chemical recycling of plastic wastes made from polyethylene (LDPE and HDPE) and polypropylene (PP) ," *J. Hazard. Mater.*, vol. 149, iss. 3, pp. 536-542, Nov. 19, 2007. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2007.06.076> .
- [20] E. T. Aisien, I. C. Otuya, and F. A. Aisien, "Thermal and catalytic pyrolysis of waste polypropylene plastic using spent FCC catalyst," *Environ. Technol. Innov.*, vol. 22, pp. 101455, May. 2021. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2021.101455> .
- [21] J. M. A. Torres, M. L. M. Constante, and E. O. P. Borja, "Evaluación de la pirólisis térmica de aceite vegetal de desecho en un reactor batch," *Revista Politécnica*, vol. 33, no. 1, Feb. 1. 2014. [Electronic resource]. Available: [https://revistapolitecnica.epn.edu.ec/ojs2/index.php/revista\\_politecnica2/article/view/137](https://revistapolitecnica.epn.edu.ec/ojs2/index.php/revista_politecnica2/article/view/137) .

[22] A. Marcilla, J. C. García-Quesada, S. Sánchez, and R. Ruiz, "Study of the catalytic pyrolysis behaviour of polyethylene-polypropylene mixtures," *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, vol. 74, iss. 1-2, pp. 387-392, Aug. 2005. <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2004.10.005>.

[23] R. Kuncser, M. Paraschiv, M. Tazeroyt, and I. Belletere, "Liquid fuel recovery through pyrolysis of polyethylene waste," *Environmental Engineering and Management Journal*, vol. 9, no. 10, pp. 1371-1374, Oct. 2010. <https://doi.org/10.30638/eemj.2010.180>.

[24] G. K. Roy, B. Kumar, and S. Jha, "Chromatographic study of the recovered gases from hydrolytic depolymerization of LDPE, MDPE and HDPE mix type of waste polyethylene," *Appl. Petrochem Res.*, no. 6, pp. 65-72, Nov. 18, 2010. <https://doi.org/10.1007/s13203-015-0138-6>.

[25] D. Damayanti, and other, "Current Prospects for Plastic Waste Treatment," *Polymers*, vol. 14, pp. 3133, Jul. 31, 2022. <https://doi.org/10.3390/polym14153133>.

Рекомендована кафедрою екології, хімії та технологій захисту довкілля ВНТУ

Стаття надійшла до редакції 28.08.2022

**Ранський Анатолій Петрович** — д-р. хім. наук, професор, професор кафедри екології, хімії та технологій захисту довкілля, e-mail: ranskiy@gmail.com.

Вінницький національний технічний університет, Вінниця;

**Коріненко Богдан Валерійович** — аспірант кафедри екології, хімії та технологій захисту довкілля, Вінницького національного технічного університету; інженер першої категорії відділу № 8 Інституту біоорганічної хімії та нафтохімії ім. В. П. Кухаря НАН України, Київ, e-mail: b.korinenko.b@gmail.com.

**A. P. Ranskyi<sup>1</sup>**  
**B. V. Korinenko<sup>1,2</sup>**

## Alternative Energy: Obtaining Synthetic Oil During the Pyrolysis Processing of Polypropylene Waste

<sup>1</sup>Vinnitsia National Technical University;

<sup>2</sup>V. P. Kukhar Institute of Bioorganic Chemistry and Petrochemistry of the National Academy of Sciences of Ukraine

*It has been shown and substantiated the expediency of processing polymer waste, in particular polypropylene waste, by the low-temperature pyrolysis method in order to obtain alternative/renewable energy sources: synthetic oil/pyrolysis liquid, pyrolysis gases and pyrocarbon. Thermodestruction of polypropylene waste on a technological unit of periodic action in the absence of air oxygen and acid catalysts has been investigated. It has been shown that carrying out the low-temperature pyrolysis of polypropylene waste in the temperature range 250...412 °C for 3.5 hours provides the yield of the main product, such as synthetic oil — 78.5 % wt., gas mixture — 13.6 % wt. and pyrocarbon — 5.1 % wt. The results of the performed research allow to state that the temperature in the pyrolysis zone of polymer waste has a determining character both on the ratio of the main products of the process — pyrolysis liquid : gas mixture : pyrocarbon, and on the chemical composition of the first two components. By fractional distillation of synthetic oil, gasoline (28.8 % vol.), lignin (12.4 % vol.), kerosene (16.0 % vol.), and diesel (23.6 % vol.) fractions were obtained. Their qualitative and quantitative analysis has been carried out by the gas chromatography. It has been established that the vast majority of compounds in different fractions are saturated hydrocarbons of normal and isomeric structure: for the gasoline fraction, saturated hydrocarbons consist 77.86 % wt., for lignin — 84.15 % wt., for kerosene — 78.92 % wt., for diesel — 60.82 % wt. Based on the obtained research results, a general scheme of thermal destruction of polypropylene waste with the production of saturated and unsaturated (C<sub>6</sub>–C<sub>13</sub>) liquid hydrocarbons, saturated and unsaturated (C<sub>1</sub>–C<sub>5</sub>) gaseous hydrocarbons, hydrogen and pyrocarbon has been proposed. A small part of alkenes (C<sub>6</sub>–C<sub>13</sub>) can undergo cyclization or aromatization to form naphthenes (C<sub>6</sub>–C<sub>13</sub>) or arenes (C<sub>8</sub>–C<sub>9</sub>).*

**Keywords:** synthetic oil, pyrolysis liquid, low-temperature pyrolysis, polymer waste, polypropylene, chromatography

**Ranskyi Anatolii P.** — Dr. Sc. (Chem.), Professor, Professor of the Chair of Ecology, Chemistry and Environmental Protection Technologies, e-mail: ranskiy@gmail.com ;

**Korinenko Bohdan V.** — Post-Graduate Student of the Chair of Ecology, Chemistry and Environmental Protection Technologies, Vinnitsia National Technical University, Vinnitsia; Engineer of the I Category of the Department of № 8 of the V. P. Kukhar Institute of Bioorganic Chemistry and Petrochemistry of the National Academy of Sciences of Ukraine, e-mail: b.korinenko.b@gmail.com