

<https://doi.org/10.31891/2307-5732-2025-351-7>

УДК 662.75:628.475.043](045)

БОЙЧЕНКО СЕРГІЙ

Національний технічний університет України
“Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського”
<https://orcid.org/0000-0002-2489-4980>
e-mail: boichenko.sergii@iill.kpi.ua

КУБЕРСЬКИЙ ІГОР

Національний технічний університет України
“Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського”
<https://orcid.org/0000-0002-3800-8484>
e-mail: Kio2773230@ukr.net

ШКІЛЬНЮК ІРИНА

Національний технічний університет України
“Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського”
<https://orcid.org/0000-0002-8808-3570>
e-mail: i_shkilniuk@ukr.net

АЛКІЛБЕНЗОЛЬНА ФРАКЦІЯ ЯК ПРОДУКТ КОНВЕРСІЇ ВІДХОДІВ – ПЕРСПЕКТИВНИЙ КОМПОНЕНТ ДЛЯ ПРОДУКУВАННЯ ЕКОЛОГІЧНИХ АВІАЦІЙНИХ БЕНЗИНІВ

У даній праці наведено результати досліджень властивостей піролізатів, отриманих конверсією поліетиленових і текстильних відходів. Встановлено, що найбільш придатною сировиною для отримання компонентів бензинів виявилися полімерні відходи – 33% виходу бензинової фракції. Екстрагована алкілбензолна фракція C₇–C₁₀ виявила високу ефективність як альтернативний високооктановий додаток (компонент, присадка) для продукування екологічно чистих авіаційних бензинів без вмісту тетра-етилсвинцю (Pb(CH₃CH₂)₄) з октановим числом 105 од.. Ця суміш є гарною альтернативою стандартному високооктановому компоненту – алкілату.

Результати досліджень засвідчили високу ефективність алкілбензольної фракції у складі модельної лабораторної суміші компонентів, якість якого відповідає вимогам ASTM D 6227 (для марки авіаційного бензину Grade UL87).

Ключові слова: алкілбензоли, фракція, технологія, відходи, піроліз, бензини, властивості, компоненти.

**BOICHENKO SERGIY,
KUBERSKYI IHOR, SHKILNIUK IRYNA**
National Technical University of Ukraine
“Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”

ALKYLBENZENE FRACTION AS A WASTE CONVERSION PRODUCT – A PROSPECTIVE COMPONENT FOR THE PRODUCTION ENVIRONMENTAL AVIATION GASOLINES

This article is devoted to the results of experimental investigations on the properties of pyrolysis liquids from polyethylene and textile waste. The most suitable raw material for obtaining gasoline components was polymer waste – 33% of the gasoline fraction yield. The qualitative composition of the pyrolysate from polymer waste indicates its high anti-knock properties. Due to the content of ballast components in the gasoline fraction, it is not rational to use it directly for the preparation of gasolines. Therefore, the C₇–C₁₀ alkylbenzene fraction was extracted from it, which showed high efficiency as an alternative high-octane additive (105 octane number) for the production of environmentally friendly aviation gasolines without tetraethyl lead (TEL, Pb(CH₃CH₂)₄). The obtained results confirmed the hypothesis of a circular approach to obtaining the alkylbenzene fraction of the gasoline fraction of pyrolysis liquid from polyethylene waste as an alternative additive (component, additive) for the production of environmentally friendly aviation gasolines. This mixture is a good alternative to the standard high-octane component – alkylate.

The results of the research demonstrated the high efficiency of the alkylbenzene fraction as part of a model laboratory mixture of components, the quality of which meets the requirements of ASTM D 6227 (for aviation gasoline grade Grade UL87).

Our work also creates a fundamental basis for further research in the field of circular economy and obtaining alternative components (additives) for the production of composite (reformulated) aviation and automotive gasolines without TEL content.

Keywords: alkylbenzenes, fraction, technology, waste, pyrolysis, gasolines, properties, additives.

Стаття надійшла до редакції / Received 11.04.2025

Прийнята до друку / Accepted 26.04.2025

Постановка проблеми у загальному вигляді

Бензини на сьогодні – один із домінуючих видів палива для двигунів внутрішнього згорання (ДВЗ) з іскровим займанням паливно-повітряної суміші (ППС). Більше половини світового балансу споживання моторних палив припадає саме на бензини, що продукуються з нафти та слугують джерелом енергії для ДВЗ [1,2]. Склад і експлуатаційні властивості регулюються відповідними фізико-хімічними параметрами бензину. Як відомо, неможливо розв’язати складну проблему, не розуміючи її детальну структуру причин і наслідків, між якими існують органічні взаємозв’язки. Цей факт фундаментально пояснюють закони хімотології [3,4], тому це необхідно досконало розуміти для

удосконалення технологій виробництва бензинів, розроблення нових рецептур, обґрунтування нових компонентів, додатків для отримання реформульованих (композиційних) екологічно чистих бензинів.

Реформульовані (зі зміненим складом, композиційні, екологічно чисті) бензини, так як і біопалива, наприклад, на сьогодні відіграють важливу роль як відновлювана енергія для транспортних засобів із ДВЗ з іскровим запалюванням ППС через виснаження ресурсів викопного палива (нафти). А також екологічно чисті бензини – комплексний інструмент досягнення глобальних цілей декарбонізації економіки, транспорту, суспільства через використання екологічно чистих компонентів і додатків.

Вирішення цих завдань дасть змогу знизити витрати цінної вуглеводневої сировини на тонну готової продукції та зменшити кількість відходів. Тому удосконалення технологій та технологічних процесів перероблення вторинної сировини є найважливішим науково-прикладним завданням економіки.

Конструкція та робота бензинового двигуна регулюється конкретними фізико-хімічними властивостями палива. Це головне знання, що необхідно для удосконалення технологій виробництва бензинового палива. З цього випливає актуальність та важливість дослідження синтетичних компонентів, отриманих піролізною конверсією вторинної сировини, для отримання композиційних реформульованих бензинів з придатними теплофізичними, термохімічними, фізико-хімічними властивостями реального палива, що відповідає вимогам сучасних стандартів, що регламентують якість бензинів. На сьогодні основна увага приділяється розробленню та використанню композиційного палива, що віддзеркалює реальні властивості стандартного палива та визначає конструкцію та роботу ДВЗ.

Аналіз досліджень та публікацій

За традиційним варіантом додатки являють собою складні хімічні сполуки, що зазвичай складаються з неорганічних і органічних речовин природного (нафтового) походження. Як правило, вихідними сполуками у виробництві додатків (присадок) застосовують алкілфеноли, спирти, крезолі, олефіни, органічні та мінеральні кислоти, оливи, формальдегід, луги, хлорид натрію, п'ятисірчаний фосфор, гідроксид барію, аміак, бензин і низка інших речовин. Класичне нафтохімічне виробництво базується на переробленні нафти, природних і супутніх газів методами полімеризації, поліконденсації, піролізу, дегідрування, алкілювання, крекінгу, реформінгу, гідратації, окиснення тощо. Продуктами промислового нафтохімічного синтезу є вуглеводні (олефіни, ароматичні вуглеводні, ацетилени тощо), високомолекулярні сполуки, а також органічні речовини інших класів (спирти, кислоти, ефіри тощо) [5].

На сьогодні у промисловості вже реалізовано низку технологічних процесів, що дають змогу використовувати відходи для одержання корисних енергетичних продуктів. Нині широкого поширення набули високомолекулярні сполуки альтернативного походження. Наприклад, останнім часом з'явилися повідомлення [6–17] про перероблення відпрацьованих шин і пластику. Однак, необхідно зазначити, що є низка виробничих відходів, що не знайшли свого кваліфікованого застосування в економіці. Наприклад, відходи текстильного виробництва та сфери харчування («фритюрні» (відпрацьовані) олії, тваринні жири, пластикові, поліетиленові відходи упаковки). Особливої уваги заслуговують відходи сфери легкої промисловості [18]. Ці відходи становлять значну частину твердих побутових відходів (ТПВ) – рис. 1 [17]. Автори [18] стверджують, що доля текстилю у загальному балансі ТПВ складає 4,6–5,4 %. Більшу частину складають відходи текстильної промисловості та інших виробництв промисловості. Оцінюється це в 25% усіх відходів, що піддаються переробленню у світі [18]. Відповідно це є значним потенціалом для виробництва різних нових продуктів, зокрема, компонентів (додатків) до моторних палив.

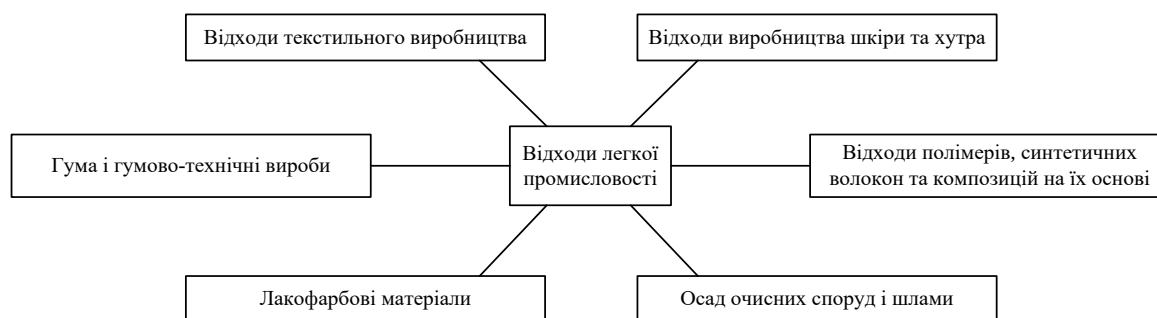


Рис. 1. Систематизація відходів сфери легкої промисловості [18]

Також заслуговує на увагу як сировина для отримання компонентів (додатків) для бензинів ще одна група відходів – полімерні відходи. Виробництво пластику в світі кожні 5 років подвоюється [18]. Прогнозується, що до 2030 р. ринок переробленого пластику досягне 114600 млн доларів США після зростання із середньорічним темпом зростання 7% протягом 2024–2030 рр.

Основні технологічні параметри процесів переробки цієї вторинної сировини систематизовані авторами [18] та зведені до таблиці 1.

Таким чином, на підставі результатів вивчення сучасних літературних джерел і тенденцій ми сформулювали гіпотезу даного дослідження: піролітичною конверсією пластикових і текстильних відходів отримувати синтетичні високооктанові компоненти (альтернатива алкілату) без вмісту високотоксичного і канцерогенного тетраетилсвинцю (ТЕС) – $Pb(CH_3CH_2)_4$ для продукування екологічно чистих авіаційних бензинів.

Таблиця 1

Основні технологічні параметри процесів хімічної переробки полімерів [18]

Найменування технології	Масштаб технології	Температура процесу, °С	Чутливість до якості вихідної сировини	Ступінь розпаду полімеру
Піроліз	Комерційний	300–700	Високий	Помірний
Плазмовий піроліз	Лабораторний	1800–10000	Низький	Дуже детальний
Мікрохвильовий піроліз	Лабораторний	До 1000	Середній	Детальний
Каталітичний крекінг	Комерційний	450–550	Високий	Помірний
Гідрокрекінг	Пілотний	375–500	Високий	Детальний
Звичайна газифікація	Комерційний	700–1200	Середній	Детальний
Плазмова газифікація	Комерційне розкладання небезпечних відходів	1200–1500	Низький	Дуже детальний
Піроліз з in-line реформуванням	Пілотний	500–900	Середній	Детальний
Хемоліз	Комерційний	210–250	Високий	Детальний

Як відомо, піроліз – це технологія, що передбачає процес термічної деструкції відходів без доступу кисню за різних температур (високотемпературний піроліз за температури вище 900°C) і низькотемпературний – 450–900°C). Цей відносно дешевий процес (табл. 1) дозволяє отримати висококалорійні компоненти для отримання альтернативних композиційних палив [6,7]. Вітчизняними вченими [8,9] обґрунтована раціональність конверсії полімерних відходів, зокрема, поліпропіленових, методом низькотемпературного піролізу з метою отримання синтез-нафти, піролізних газів та пірокарбону. Низькотемпературний піроліз відходів поліпропілену у температурному інтервалі 250–412°C протягом 3,5 год забезпечив вихід синтез-нафти – 78,5% мас., газової суміші – 13,6% мас., пірокарбону – 5,1% мас. Авторами [8,9] доведено, що значна кількість компонентів різних фракцій є насиченими вуглеводнями нормальної та ізомерної будови: для бензинової фракції вони складають 77,86% мас., для лігроїнової – 84,15% мас., для керосинової – 78,92%, для дизельної – 60,82% мас. Вітчизняними вченими [10–17] також досліджувались склад і властивості піролізних рідин, отриманих переробленням відпрацьованих шин. Таких досліджень в літературі можна знайти значно більше. Це свідчить про увагу науковців і практиків до цієї теми та достатність рівня її дослідження. Заслугує на увагу висновок досліджень авторів [10–14] щодо непридатності вивчених бензинових фракцій (< 140°C і 140–200°C) не можуть бути використані як компоненти промислових палив через високий вміст ненасичених та ароматичних вуглеводнів. Про це додатково засвідчено аналізуванням інфрачервоною спектроскопією та хроматографією. Автори праць [10–14] пропонують використовувати ці компоненти для додавання до складу мазутів і бітумів. Наприклад, як вказують автори [10–14], додавання отриманих компонентів до складу дорожнього бітуму марки БНД 70/100 у кількості 1% мас. дозволяє отримати бітум з покращеними адгезійними властивостями марки БНДА 60/90.

На підставі виконаного аналізу літератури ми переконались в актуальності дослідження якісного та кількісного складу піролізних рідин, отриманих переробкою пластикових (поліетиленових) і текстильних відходів.

Аналіз літературних джерел дозволив нам дійти висновку про відсутність достатньої кількості відомостей про хімічний склад і властивості додатків (присадок) до складу авіаційних бензинів альтернативного виробництва. Так, автором [2] наведено детальний аналіз різних класів сполук, що використовуються для створення композиційних бензинів (н-парафіни, ізопарафіни, олефіни, нафтени та ароматичні речовини).

Разом з певним прогресом у цій царині, зазначаємо, що існує низка прогалин, що актуалізовано визначають необхідність додаткових наукових розвідок.

Формулювання цілей статті

Метою даної праці стало обґрунтування використання вторинної сировини – пластикових (поліетиленових) і текстильних відходів піролізом для отримання синтетичних високооктанових компонентів для продукування авіаційних бензинів.

Об'єктом дослідження було визначено піролітичну конверсію пластикових і текстильних відходів та використання отриманих високооктанових компонентів для продукування авіаційних бензинів. А предметом дослідження – властивості бензинових фракцій, їх алкілбензольних компонентів як продуктів конверсії пластикових і текстильних відходів. Зразки для дослідження були надані ТОВ “Вейстенерджі”, м. Луцьк, де піроліз відходів здійснювали за температури 420–430°C тиск та тиску 50 кПа. Вихід піроконденсату становив 87–89% мас. на сировину.

Виклад основного матеріалу

Найважливішими та визначальними властивостями для бензинів, особливо, авіаційних є їх детонаційна стійкість, що характеризується октановим числом (ОЧ) і сортністю на багатій суміші [1]. Детонаційна стійкість (антидетонаційні властивості) бензинів обумовлюється та формується властивостями високооктанових компонентів, що входять до їх складу. А якість високооктанових компонентів регламентується відповідними нормативними документами табл. 2.

Таблиця 2

Вибрані показники якості високооктанових компонентів бензинів [1]

Найменування показника	Алкілбензин		Ізооктан технічний
	бутиленовий	пропілен-бутиленовий	
О	90/91,5	89/90	90
З	—	—	107
С	140	130	—
Ф			
р п	40	40	40
а ф	75	75	80
ж 9	108/105	105	105
ц 9%	140/130	140	140
і 9%	170/130	—	—
й 9%	180	180	—
н 9%	1,5	1,5	1,5
Т	25(350)	25(350)	25(350)
К	0,5(0,35)	0,5(0,35)	0,4
Й	1,0(0,35)	1,0(0,35)	1,5
К	2	2	2
М	0,025	0,025	0,02
В	—	Немає	
В	—	Немає	
В	—	Витримує	

У табл. 3 представлені основні класи вуглеводнів, що входять до складу авіаційних бензинів, а усереднений компонентний склад традиційних і альтернативних бензинів проілюстровано в табл. 4.

Усереднений вуглеводневий склад авіаційних бензинів [1]

Клас вуглеводнів	Масова частка вуглеводнів, %
Алкани (нормальної та ізобудови)	10–40
Циклоалкани	20–60
Арени	20–22
Моноциклічні арени	3–25
Біциклічні арени	1–5

Усереднений компонентний склад бензинів [1]

Найменування компоненту	Масова частка, % (об.)		
	Традиційний бензин		Реформульований бензин
	ЄС	США	США
Бутан та ізобутан	5,7	5,5	3,5
Бензин каталітичного реформінгу	46,9	40,3	24,6
Бензин каталітичного крекінгу	27,1	33,0	28,1
Алкілат	4,1	9,4	16,5
Полімеризат	1,8	1,0	1,4
Ізомеризат	5,0	5,5	11,6
Бензин гідрокрекінгу	7,6	1,6	3,5
Кисневмісні сполуки	1,8	3,4	10,8

Розглядаючи піролізні рідини, отримані з полімерних і текстильних відходів, як сировину для отримання компонентів бензинів, ми перш за все оцінили їх потенціал. Як відомо, ефективне використання піролізної рідини визначається її компонентним складом. З метою кількісного та якісного аналізу отриманої піролізної рідини та можливого її подальшого практичного використання як компоненту альтернативного моторного палива необхідно провести визначення фракційного складу тощо. Тому попередньо нами було проведено фракціонування досліджуваних піролізних рідин. Розділення на фракції (кількісний аналіз), а також визначення властивостей піроконденсату та вузьких фракцій, виділених з нього, виконували стандартними методиками [1]. Отримані результати систематизовано у таблиці 5.

Таблиця 5

Склад піролізатів і вихід паливних фракцій

Найменування фракції	Температурний режим, °С	Вихід фракції, %	
		Піролізат з полімерних відходів	Піролізат з текстильних відходів
Бензинова	56–180	32	23
Дизельна	180–360	30	40
Керосинова	145–270	38	36

Як бачимо (табл. 5) більшим потенціалом для продукування компонентів бензинів має піроліз на рідина, отримана з полімерних відходів.

Окремої уваги у своїх дослідженнях ми приділили вивченню якісного складу продуктів переробки полімерних і текстильних відходів. Дослідження проводили хроматографічним методом за допомогою модернізованого хроматографічного комплексу на базі хроматографа Crystal 2000КЛ» Державного підприємства “Український державний науково-дослідний вуглехімічний інститут (УХІН)”. Результати дослідження наведені на рис. 2, 3. Аналіз отриманих результатів дозволив дійти висновку, що у складі піролізату з відходів текстильної промисловості близько 63% знаходяться представники ароматичних вуглеводнів, насичені вуглеводні аліфатичного ряду (алканові) ~ 5%, представники ненасичених вуглеводнів ~ 14%. Решта компонентів ~ 18% не представляють енергетичної цінності у контексті завдання, що вирішується у даній праці. З точки зору використання для отримання компонентів бензинів, у тому числі високооктанових, більший інтерес викликали результати вивчення якісного та кількісного складу піролізату з поліетиленових відходів. Як бачимо з рис. 3 у складі піролізату з поліетиленових відходів 14–18% (16%) – представники ароматичних вуглеводнів, представники алканових ~ 32–33%, представники ненасичених – 20–30% (25%), представники спиртів – більше 2%, близько 24% – високомолекулярні сполуки. На підставі отриманих результатів ми дійшли висновку, що найбільш придатною сировиною для отримання компонентів бензинів є полімерні відходи, що володіють вищим енергетичним потенціалом – 33% виходу бензинової фракції для отримання компонентів як автомобільних, так і авіаційних бензинів. Отриманий якісний склад піролізату з полімерних відходів свідчить про їх високі антидетонаційні властивості, що додатково засвідчує цінність як сировини для отримання реформульованих (композиційних) бензинів.

Розвиваючи наше припущення щодо отримання високооктанових компонентів з піролізної рідини як продукту конверсії поліетиленових відходів і аналізування компонентного складу ми виділили алкілбензольну фракцію C_7 – C_{10} бензинової фракції. Використовувати бензинову фракцію як основу для приготування бензину не рекомендуємо через вміст сторонніх компонентів (рис. 3). Проте, як джерело окремих вуглеводнів або їх сумішей – це потенційний високооктановий компонент для бензинів. Досліджені властивості цієї фракції ми звели до табл. 6.

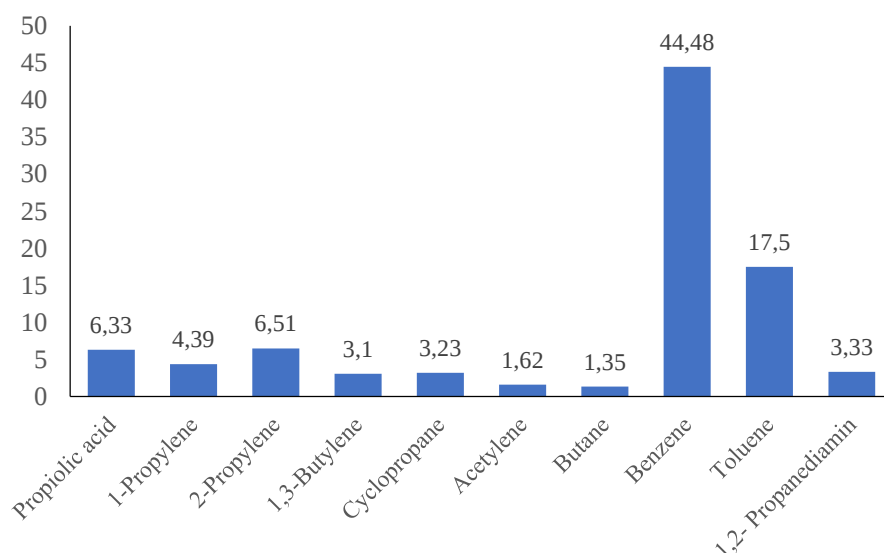


Рис. 2. Узагальнений склад піролізату з текстильних відходів

Таблиця 6

Характеристика дослідженої алкілбензольної фракції

Густина за температури 20°C, кг/м³	Температура кипіння, °C	Температура початку кристалізації, °C	Октанове число за моторним методом, од.	Нижча теплота згорання, МДж/кг
857,7	69–147	мінус 64	105	40,5

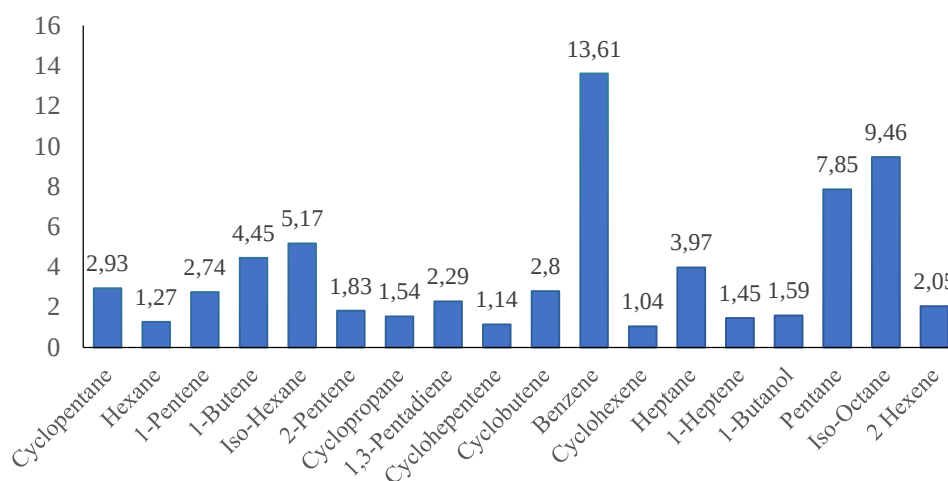


Рис. 3. Узагальнений склад піролізату з поліетиленових відходів

Аналізуючи дослідження світових вчених [19,20] ми переконалися у висновку, що екстракція такої специфічної групи є певним чином діагностичною (ідентифікаційною) в традиційних нафтових дистилатах, з яких не видалено ароматичні речовини. Елююючи між C_9 і C_{10} , як показано на рис. 4 ця група дуже помітна на хроматограмі бензину, наприклад. Вона починається з н-пропілбензолу, за яким слідує 3-етилтолуол, що частково змішується з 4-етилтолуолом, а потім 1,3,5-триметилбензол і 2-етилтолуолом. За властивостями дуже схоже на традиційний високооктановий компонент алкілат (суміш ізоалканів C_6 – C_9 , отримана за допомогою алкілювання алканів алкенами) – табл. 7.

Таблиця 7

Порівняльна характеристика властивостей алкілату та алкілбензольної фракції

Найменування показника	Одиниці вимірювання	Значення показника	
		алкілату	алкілбензольної фракції
Густина за температури 20 °C	кг/м³	695,0–710,0	857,7
Температура початку кипіння	°C	35–50	69–74
Температура кінця кипіння	°C	155–210	136–157
Температура кристалізації	°C	мінус 60	мінус 64

Тиск насиченої пари	кПа	25–75	–
ОЧ за моторним методом	од.	93	105

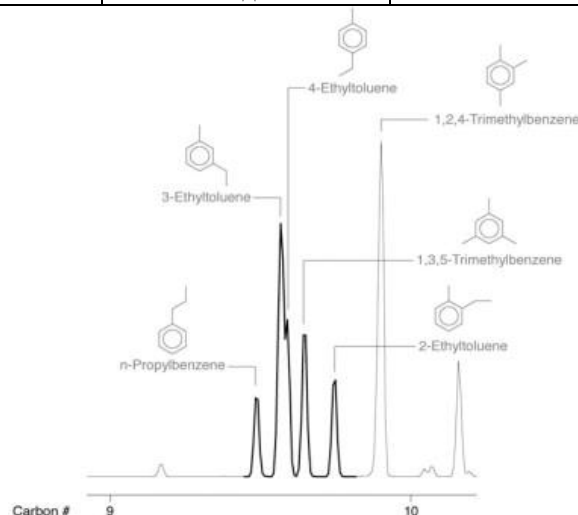


Рис. 4. Вибрані типові представники з алкілбензольної фракції [18]

На фінальному етапі дослідження нами було приготовлено декілька модельних лабораторних зразків авіаційного бензину з використанням отриманої алкілбензольної фракції C_7 – C_{10} для вивчення фізико-хімічних властивостей цих композицій та аналізу їх відповідності вимогам світових стандартів, що ставлять вимоги до якості сучасних авіаційних бензинів ASTM D 7719 «Standard Specification for High Aromatic Content Unleaded Hydrocarbon Aviation Gasoline Test Fuel», ASTM D 6227 «Standard Specification for Unleaded Aviation Gasoline Containing a Non-hydrocarbon Component» [20,21] з урахуванням вимог ASTM D 7826 «Standard Guide for Evaluation of New Aviation Gasolines and New Aviation Gasoline Additives». Моделі композиційних бензинів компаундували з таких компонентів: зразок 1 – 30% легкої бензинової фракції (ЛБФ) + 40% ізомеризату (продукт ізомеризації фракції C_5 – C_6 з ОЧ = 85 од.) + 30% алкілбензольної фракції; зразок 2 – 40% ЛБФ + 40 ізомеризату + 20% алкілбензольної фракції. Усі компоненти вітчизняного виробництва. Фізико-хімічні властивості за ідентифікаційними показниками визначали стандартними методами. Результати дослідження представлено в таблиці 8.

З аналізу отриманих результатів (табл. 8) ми дійшли висновку про придатність модельного лабораторного зразка авіаційного бензину відповідності вимогам ASTM D 6227 (для марки Grade UL87) за переліком ідентифікаційних показників.

Висновки та перспективи подальших розвідок

Експериментально досліджено властивості піролізних рідин з поліетиленових і текстильних відходів. Найбільш придатною сировиною для отримання компонентів бензинів виявилися полімерні відходи – 33% виходу бензинової фракції. Якісний склад піролізату з полімерних відходів свідчить про їх високі антидетонаційні властивості. Так як у складі бензинової фракції містяться сторонні компоненти її не раціонально використовувати для приготування бензинів. Тому з неї було екстраговано алкілбензольну фракцію C_7 – C_{10} , що виявила високу ефективність як альтернативний високооктановий додаток (компонент, присадка) для продукування екологічно чистих авіаційних бензинів без вмісту ТЕС. Отримані результати підтвердили гіпотезу циркулярного підходу отримання алкілбензольної фракції бензинової фракції піролізної рідини з поліетиленових відходів як альтернативного додатку (компонента, присадки) для продукування екологічно чистих авіаційних бензинів.

Ці дослідження виконувались в рамках науково-дослідних проєктів, що фінансувалися за рахунок державного бюджету України (реєстраційні номери 2023.04/0146 і 0124U000973), а також ініціативних тематик кафедри автоматизації електротехнічних і мехатронних комплексів КПІ ім. Ігоря Сікорського.

Також наша праця створює підґрунтя та окреслює перспективи подальших досліджень у сфері циркулярної економіки та отримання альтернативних компонентів (додатків, присадок) для продукування композиційних (реформульованих) авіаційних і автомобільних бензинів без вмісту ТЕС.

Таблиця 8

Порівняльна характеристика результатів дослідження
модельних лабораторних зразків композиційних авіаційних бензинів

№ з/п	Найменування показника	Вимоги згідно		Зразок 1	Зразок 2
		ASTM D7719	ASTM D 6227		
1	Октанове число: за моторним методом	не нижче 102,2	не нижче 87,0	90,6	90,2

2	Фракційний склад: - температура початку перегонки, °С - 10% переганяється за температури, °С - 50% переганяється за температури, °С - 90% переганяється за температури, °С - кінець кипіння, °С - втрати від випаровування, %	- не нижче 75 не вище 105 не вище 135 не вище 170 не вище 1,5	- не нижче 70 у межах 66–121 не вище 190 не вище 225 не більше 3	41 75 110 151 184 1,8	41 71 101 133 171 1,54
3	Тиск насиченої пари, кПа	38,0–49,0	38,0–62,0	39,9	39,5
4	Температура кристалізації, °С	не вище мінус 58	не вище мінус 58	Мінус 60	Мінус 60
5	Випробування на мідній пластинці за температури 100 °С протягом 2 год, бали	Не більше 1	Не більше 1	16	16
6	Густина за температури 15°С, кг/м ³	790–825	Не нормується	738	735
7	Колір	-	Непофарбований	Жовтувата прозора рідина	Жовтувата прозора рідина
8	Нижча теплота згорання, МДж/кг	не нижче 41,5	не нижче 40,8	43,13	43,16

Література

1. Бойченко, С., Пушак, А., Топільницький, П., & Лейда, К. (2017). *Моторні палива: властивості та якість* (С. Бойченко, ред.). Київ: Центр учбової літератури. <https://ela.kpi.ua/items/aeaafec-d022-4136-a7d1-94f8a23ee2d0>
2. Sarathy, S. M., Farooq, A., & Kalghatgi, G. T. (2018). Recent progress in gasoline surrogate fuels. *Progress in Energy and Combustion Science*, 65, 67–108. <https://doi.org/10.1016/j.pecs.2017.09.004>
3. Boichenko, S., Aksionov, O., Topilnyskyi, P., Pushak, A., & Lejda, K. (2019). *Selected aspects of providing the chemmotological reliability of the engineering* (S. Boichenko, Ed.). Kyiv: Center for Educational Literature.
4. Boichenko, S. (2014). Innovative chemmotological thought as an integrated system of knowledge. *Chemistry & Chemical Technology*, 8(3), 349–358.
5. Братичак, М. М. (2008). *Основи промислової нафтохімії*. Львів: Видавництво Львівської політехніки.
6. Yaqoob, H., Ali, H. M., & Khalid, U. (2025). Pyrolysis of waste plastics for alternative fuel: A review of key factors. *RSC Sustainability*, 3, 208–218. <https://doi.org/10.1039/D4SU00504J>
7. Yaqoob, H., Ali, H. M., Sajjad, U., & Hamid, K. (2024). Investigating the potential of plastic pyrolysis oil-diesel blends in diesel engine: Performance, emissions, thermodynamics and sustainability analysis. *Results in Engineering*, 24, 103336. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2024.103336>
8. Ранський, А. П., & Коріненко, Б. В. (2023). Альтернативна енергетика: Отримання синтез-нафти в процесі піролізної переробки поліпропіленових відходів. *Вісник Вінницького політехнічного інституту*, (2), 6–14. <https://doi.org/10.31649/1997-9266-2023-167-2-6-14>
9. Коріненко, Б. В., Євдокименко, В. О., Ранський, А. П., Гордієнко, О. А., & Коріненко, Р. В. (2024). Альтернативна енергетика. Повідомлення III. Удосконалена технологія піролізної переробки суміші полімерних відходів. *Вісник Вінницького політехнічного інституту*, (2), 25–32. <https://doi.org/10.31649/1997-9266-2024-173-2-25-32>
10. Pyshyev, S., Lypko, Y., Chervinsky, T., Fedevych, O., Kulażyński, M., & Pstrowska, K. (2023). Application of tyre derived pyrolysis oil as a fuel component. *South African Journal of Chemical Engineering*, 43, 342–347. <https://doi.org/10.1016/j.sajce.2022.12.003>
11. Pyshyev, S., Lypko, Y., Korchak, B., Poliuzhyn, I., Hubrii, Z., Pochapska, I., & Rudnieva, K. (2024). Study on the composition of gasoline fractions obtained as a result of waste tires pyrolysis and production bitumen modifiers from it. *Journal of the Energy Institute*, 114, 101598. <https://doi.org/10.1016/j.joei.2024.101598>
12. Гринишин, К. О., Скорохода, В. Й., & Червінський, Т. І. (2021). Склад і властивості піроконденсату піролізу зношених автомобільних шин. *Chemistry, Technology and Application of Substances*, 4(2), 28–32. <https://doi.org/10.23939/ctas2021.02.028>
13. Гринишин, К. О., Скорохода, В. Й., & Червінський, Т. І. (2023). Поліетиленові відходи – сировина для одержання компонентів моторних палив. *Chemistry, Technology and Application of Substances*, 6(2), 55–60. <https://doi.org/10.23939/ctas2023.02.055>
14. [Повтор з №10 — не дублюється]

15. Чмель, В. М., Новикова, І. П., Кондратьєв, Є. М., & Оп'ятюк, В. В. (2009). Використання рідких вуглеводневих сумішей техногенного походження в якості палива у печах та котлоагрегатах промислової та комунальної енергетики. *Відновлювальна енергетика*, (1), 11–16.
16. Маркіна, Л. М., & Крива, М. С. (2018). Дослідження технологічних параметрів піролізу зношених автомобільних шин при їх статичному навантаженні. *Наука та інновації*, 14(6), 38–54. <http://dspace.nbuv.gov.ua/handle/123456789/162614>
17. Шевченко, К. В., & Григоров, А. Б. (2024). Вторинні полімери як перспективна сировина для виробництва високооктанового автомобільного бензину. *Інтегровані технології та енергозбереження*, (1), 99–107. <https://doi.org/10.20998/2078-5364.2024.1.09>
18. Синюк, О. М., Іванішєна, Т. В., Кулєшова, С. Г., Надопта, Т. А., & Горьашєнко, С. Л. (2023). *Теоретичні засади та практична реалізація комплексної переробки полімермістких відходів у виробі легкої промисловості*. Хмельницький: ХНУ.
19. Stauffer, E., Dolan, J. A., & Newman, R. (2008). Interpretation of data obtained from neat ignitable liquids. In E. Stauffer, J. A. Dolan, & R. Newman (Eds.), *Fire Debris Analysis* (pp. 295–354). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-012663971-1.50013-0>
20. Boot, M. D., Tian, M., Hensen, E. J. M., & Sarathy, S. M. (2017). Impact of fuel molecular structure on auto-ignition behavior – Design rules for future high performance gasolines. *Progress in Energy and Combustion Science*, 60, 1–25. <https://doi.org/10.1016/j.pecs.2016.12.001>
21. Chen, W., Zong, R., Ye, W., Zhou, X., & Li, C. (2019). An economical approach to produce isopentane component for modern aviation gasoline fuels. *Petroleum Science and Technology*, 37(1), 15–20. <https://doi.org/10.1080/10916466.2018.1471499>
22. Kondakova, O., & Boichenko, S. (2018). Environmentally clean reformulated aviation gasoline. In T. Karakoç, C. Colpan, & Y. Şöhret (Eds.), *Advances in Sustainable Aviation* (pp. 1–18). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-319-67134-5_1

References

1. Boichenko, S., Pushak, A., Topilnytskyi, P., & Leida, K. (2017). *Motomi palyva: vlastyivosti ta yakist* (S. Boichenko, red.). Kyiv: Tsentr uchbovoi literatury. <https://ela.kpi.ua/items/aeaafec-d022-4136-a7d1-94f8a23ee2d0>
2. Sarathy, S. M., Farooq, A., & Kalghatgi, G. T. (2018). Recent progress in gasoline surrogate fuels. *Progress in Energy and Combustion Science*, 65, 67–108. <https://doi.org/10.1016/j.pecs.2017.09.004>
3. Boichenko, S., Aksionov, O., Topilnytskyi, P., Pushak, A., & Lejda, K. (2019). Selected aspects of providing the chemmotological reliability of the engineering (S. Boichenko, Ed.). Kyiv: Center for Educational Literature.
4. Boichenko, S. (2014). Innovative chemmotological thought as an integrated system of knowledge. *Chemistry & Chemical Technology*, 8(3), 349–358.
5. Bratychak, M. M. (2008). *Osnovy promyslovoi naftokhimii*. Lviv: Vydavnytstvo Lvivskoi politekhniki.
6. Yaqoob, H., Ali, H. M., & Khalid, U. (2025). Pyrolysis of waste plastics for alternative fuel: A review of key factors. *RSC Sustainability*, 3, 208–218. <https://doi.org/10.1039/D4SU00504J>
7. Yaqoob, H., Ali, H. M., Sajjad, U., & Hamid, K. (2024). Investigating the potential of plastic pyrolysis oil-diesel blends in diesel engine: Performance, emissions, thermodynamics and sustainability analysis. *Results in Engineering*, 24, 103336. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2024.103336>
8. Ranskyi, A. P., & Korinenko, B. V. (2023). Alternatyvna enerhetyka: Otrymannia syntez-nafty v protsesi piroliznoi pererobky polipropilenovykh vidkhodiv. *Visnyk Vinnytskoho politekhnichnoho instytutu*, (2), 6–14. <https://doi.org/10.31649/1997-9266-2023-167-2-6-14>
9. Korinenko, B. V., Yevdokymenko, V. O., Ranskyi, A. P., Hordiienko, O. A., & Korinenko, R. V. (2024). Alternatyvna enerhetyka. Povidomlennia III. Udoskonalena tekhnolohiia piroliznoi pererobky sumishi polimernykh vidkhodiv. *Visnyk Vinnytskoho politekhnichnoho instytutu*, (2), 25–32. <https://doi.org/10.31649/1997-9266-2024-173-2-25-32>
10. Pyshyev, S., Lypko, Y., Chervinskyi, T., Fedevych, O., Kułazyński, M., & Pstrowska, K. (2023). Application of tyre derived pyrolysis oil as a fuel component. *South African Journal of Chemical Engineering*, 43, 342–347. <https://doi.org/10.1016/j.sajce.2022.12.003>
11. Pyshyev, S., Lypko, Y., Korchak, B., Poliuzhyn, I., Hubrii, Z., Pochapska, I., & Rudnieva, K. (2024). Study on the composition of gasoline fractions obtained as a result of waste tires pyrolysis and production bitumen modifiers from it. *Journal of the Energy Institute*, 114, 101598. <https://doi.org/10.1016/j.joei.2024.101598>
12. Hrynshyn, K. O., Skorokhoda, V. Y., & Chervinskyi, T. I. (2021). Sklad i vlastyivosti pirokondensatu pirolizu znošenyykh avtomobilnykh shyn. *Chemistry, Technology and Application of Substances*, 4(2), 28–32. <https://doi.org/10.23939/ctas2021.02.028>
13. Hrynshyn, K. O., Skorokhoda, V. Y., & Chervinskyi, T. I. (2023). Polietylenovi vidkhody – syrovyna dlia oderzhannia komponentiv motornykh palyv. *Chemistry, Technology and Application of Substances*, 6(2), 55–60. <https://doi.org/10.23939/ctas2023.02.055>
14. [Povtor z №10 — ne dubliuetsia]
15. Chmel, V. M., Novykova, I. P., Kondratiev, Ye. M., & Opiatiuk, V. V. (2009). Vykorystannia ridkykh vuhlevodnevyykh sumishei tekhnohennoho pokhodzhennia v yakosti palyva u pechakh ta kotloahrehatakh promyslovoi ta komunalnoi enerhetyky. *Vidnovliuvalna enerhetyka*, (1), 11–16.
16. Markina, L. M., & Kryva, M. S. (2018). Doslidzhennia tekhnolohichnykh parametriv pirolizu znošenyykh avtomobilnykh shyn pry yikh statychnomu navantazhenni. *Nauka ta innovatsii*, 14(6), 38–54. <http://dspace.nbuv.gov.ua/handle/123456789/162614>
17. Shevchenko, K. V., & Hryhorov, A. B. (2024). Vtorynni polimery yak perspektyvna syrovyna dlia vyrobnytstva vysokooktanovoho avtomobilnogo benzynu. *Intehrovani tekhnolohii ta enerhozberzhennia*, (1), 99–107. <https://doi.org/10.20998/2078-5364.2024.1.09>
18. Syniuk, O. M., Ivanishena, T. V., Kuleshova, S. H., Nadopta, T. A., & Horiashchenko, S. L. (2023). *Teoretychni zasady ta praktychna realizatsiia kompleksnoi pererobky polimermistkykh vidkhodiv u vyrobny lehkoi promyslovosti*. Khmelnytskyi: KhNU.
19. Stauffer, E., Dolan, J. A., & Newman, R. (2008). Interpretation of data obtained from neat ignitable liquids. In E. Stauffer, J. A. Dolan, & R. Newman (Eds.), *Fire Debris Analysis* (pp. 295–354). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-012663971-1.50013-0>

-
20. Boot, M. D., Tian, M., Hensen, E. J. M., & Sarathy, S. M. (2017). Impact of fuel molecular structure on auto-ignition behavior – Design rules for future high performance gasolines. *Progress in Energy and Combustion Science*, 60, 1–25. <https://doi.org/10.1016/j.pecs.2016.12.001>
21. Chen, W., Zong, R., Ye, W., Zhou, X., & Li, C. (2019). An economical approach to produce iso-pentane component for modern aviation gasoline fuels. *Petroleum Science and Technology*, 37(1), 15–20. <https://doi.org/10.1080/10916466.2018.1471499>
22. Kondakova, O., & Boichenko, S. (2018). Environmentally clean reformulated aviation gasoline. In T. Karakoç, C. Colpan, & Y. Şöhret (