

УДК 502.174:628.477.043]:662.7(045)

Сергій Бойченко, д-р техн. наук, професор, <https://orcid.org/0000-0002-2489-4980>

Софія Жолтайли*, д-р філософії (PhD), <https://orcid.org/0000-0001-8136-8779>

Ірина Шкільнюк, канд. техн. наук, <https://orcid.org/0000-0002-8808-3570>

Ігор Куберський, <https://orcid.org/0000-0002-3800-8484>

Ігор Левандовський, канд. хім. наук, доцент, <https://orcid.org/0000-0002-2237-0403>

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені
Ігоря Сікорського», Берестейський просп., 37, м. Київ, 03056, Україна

*Автор-кореспондент: dokshyna.sofiia@iitl.kpi.ua

АНАЛІЗ ПОТЕНЦІАЛУ ОТРИМАННЯ КОМПОЗИЦІЙНОГО МОТОРНОГО ПАЛИВА З ВІДХОДІВ ПЛАСТИКУ ТА ПОЛІЕТИЛЕНУ ТА ВІДХОДІВ ЗНОШЕНИХ ШИН В УКРАЇНІ

Анотація. У даному дослідженні розглядається питання аналізу обсягів утворення відходів пластику, поліетилену, зношених шин в Україні та оцінка потенціалу отримання альтернативного палива з цих відходів. Ці відходи накопичуються у світі швидкими темпами, і Україна не є виключенням. Тому метою даного дослідження є визначення потенціалу отримання вітчизняного альтернативного палива з відходів пластику, поліетилену та відходів зношених шин. Об'єктом дослідження є утилізація відходів пластику, поліетилену та зношених шин. Предметом дослідження – відходи пластику, поліетилену та зношених шин, їх енергетичний потенціал з метою отримання альтернативного палива. Робочою гіпотезою дослідження є те, що налагодження екології збору та перетворення даних відходів здатне частково вирішити енергетичну ситуацію в країні. За метод дослідження був вибраний систематичний огляд наявних досліджень, оскільки офіційні дані Державної служби статистики України не повною мірою відображають наявний стан утворення цих відходів. В результаті дослідження було встановлено наступне. Обсяг пластикових відходів, що утворюються в Україні щороку, становить від 990 тис. т/рік до 1820 тис. т/рік, що в середньому складає 1405 тис. т/рік. Відповідно, обсяги палива, котрі можна отримати від пластикових відходів, становлять від 297 тис. т/рік до 1729 тис. т/рік. Щороку неутілізованими залишаються 3–4,1 млн тонн відходів поліетилену. Потенціал отримання палива з поліетиленових відходів становить від 1500 тис. т/рік до 3700 тис. т/рік. В Україні утворюється 225–360 тис. тонн неутілізованих зношених шин щороку. Потенціал отримання палива від відходів зношених шин складає від 67,5 тис. т/рік до 180 тис. т/рік. Отже, сумарний потенціал отримання моторного палива з відходів пластику, поліетилену та зношених шин складає від 1864,5 тис. т/рік до 5609 тис. т/рік та свідчить про необхідність налагодження екології цих відходів в Україні. Висунута гіпотеза підтверджена результатами цих досліджень.

Ключові слова: композиційні моторні палива, утилізація пластику, утилізація поліетилену, утилізація зношених шин, екологістика, енергоефективність, декарбонізація.

1. Вступ

Щорічно обсяги сміття зростають жахливими темпами, забруднюючи довкілля, шкодячи здоров'ю людей та завдаючи значних економічних збитків. Вивчення цієї проблеми, аналіз її складових та пошук шляхів вирішення є надзвичайно актуальними завданнями сьогодення. Відходи є невід'ємною частиною будь-якої економічної діяльності, і правильне поводження з ними є критично важливим для збереження довкілля та здоров'я людей. Серед різних типів відходів особливе місце

займають пластикові, поліетиленові, відходи зношених шин, які мають свої особливості та впливають на екосистеми та економіку.

Пластикові відходи, включаючи поліетиленові, що складають окрему підкатегорію, є однією з найбільших екологічних проблем сучасності. Пластик характеризується довговічністю і стійкістю до розкладу (80–600 років) [1], що призводить до його накопичення у природному середовищі. Пластикові відходи забруднюють океани, річки та ґрунти, негативно впливаючи на флору і фауну [2]. Крім того, вони можуть потрапляти в харчовий ланцюг і впливати на здоров'я людей і тварин [3].

Автомобільні шини є ще одним значним джерелом забруднення. Гума також розкладається дуже повільно (120–140 років) [4] і при неправильному поводженні утворює токсичні сполуки [5], які можуть забруднювати ґрунт і воду. Водночас вторинна переробка гумових відходів має значний потенціал для зменшення їхнього негативного впливу та використання у виробництві нових матеріалів або отримання альтернативного палива. Великі обсяги відходоємності [6] в Україні свідчать про необхідність пошуку шляхів утилізації відходів. З іншого боку, залежність поставок палива в Україну від країн Європи потребує пошуку шляхів вирішення зменшення паливної залежності.

Тому метою даного дослідження є визначення потенціалу отримання вітчизняного альтернативного палива з відходів пластику, поліетилену та відходів зношених шин. Об'єктом дослідження є утилізація відходів пластику, поліетилену та зношених шин, їх енергетичний потенціал з метою отримання альтернативного палива. За метод дослідження був вибраний систематичний огляд наявних досліджень, оскільки офіційні дані Державної служби статистики України не повною мірою відображають наявний стан утворення цих відходів. Робочою гіпотезою дослідження є те, що налагодження екологістики збору та перетворення даних відходів здатне частково вирішити енергетичну ситуацію в країні. Нижче наведені матеріали дослідження та їх результати для підтвердження гіпотези.

2. Методи та матеріали

2.1 Полімерні відходи

Утворення побутових відходів у світі. Якщо дивитись глобально, то на кожного жителя планети припадає близько 1 тонни відходів [7]. За іншими даними, у світі в середньому утворюється 0,74 кг відходів на душу населення на добу, а національні показники утворення відходів коливаються в широких межах: від 0,11 кг до 4,54 кг на душу населення на добу [8].

Утворення пластикових відходів у світі. Станом на 2015 р. у світі утворилось майже 6,3 млрд т пластикових відходів. Обсяги світового виробництва пластику щорічно збільшуються на 8,4 % [7]. За іншими даними, приріст виробництва та використання пластику становить 10–15 % [9]. За оцінками [10, 11], в Україні можливо переробляти 337 тис. тонн поліетилену, але переробляється лише 180 тис. тонн (53 %).

Утворення поліетиленових відходів у світі. За даними ООН, щосекунди у світі використовують близько 160 тисяч поліетиленових пакетів [10]. А це приблизно 160 тис. • 34г = 5,4 тонн відходів поліетилену щосекунди! Наприкінці 2018 року загальна маса первинних полімерних відходів у світі досягла 6900 млн т, з яких 800 млн т припадає на поліетилентерефталат (ПЕТ) [12]. Причому, за даними аналізу світового ринку, що був виконаний компанією Smithers Pira, світове виробництво ПЕТ у 2013 р. становило 11,84 млн т, а щорічний приріст споживання склав 5,2 %. [13].

Утворення твердих побутових відходів на території України. Згідно з даними Державної служби статистики України, щорічно в Україні утворюється 350 млн тонн відходів [14], з яких лише 5 % відправляється на переробку [15]. Тобто приблизно 17,5 млн тонн відходів у кращому випадку утилізується, а інші 332,5 млн тонн залишаються неутілізованими щороку.

Дослідження Національної комісії, що здійснює державне регулювання у сферах енергетики та комунальних послуг (НКРЕКП), приводять подібні дані, зазначаючи, що на одного жителя багатоповерхового будинку припадає 350 кг твердих побутових відходів (ТПВ) на рік, а на жителя приватного будинку – 450 кг сміття на рік [14]. При рівні утилізації відходів у 5 % щороку утилізується лише 17,5 кг та 22,5 кг ТПВ на жителя багатоквартирного та жителя приватного будинків відповідно, а решта відходів – 332,5 кг та 427,5 кг – залишається неутилізованою. Існує статистика і за утворенням побутових відходів у малих та великих містах: 220–250 кг/душу населення у малих та 330–380 кг/душу населення у великих містах [16], що трішки менше за статистику, надану НКРЕКП. За даними [8], обсяги ТПВ в Україні складають у середньому 300–400 кг на одного жителя. За даними [17], ця цифра сягає 250–270 кг на душу населення на рік.

За даними Міністерства екології та природних ресурсів України [16, 18], в Україні утворилось 36 млрд тонн сміття на кінець 2017 року, з котрих лише 3 % складають тверді побутові відходи; за іншими даними 2018 року, Україна є лідером з кількості відходів на душу населення, накопичивши 30 млрд тонн відходів [19]. Дані Міністерства екології та природних ресурсів України більш надійні.

За даними [10], в Україні утворюється щорічно близько 14 млн тонн побутових відходів, а за даними [12] – 11 млн тонн побутових відходів. За даними [16], на кожного українця зараз приходить більше як 750 тонн відходів загалом і щорічне утворення цих відходів складає 15–17 тонн на душу населення.

Щодо твердих промислових відходів, в Україні їх накопичення (без суттєвої утилізації) призвело до такої прогресії: якщо в 1980 році на одного жителя припадало 240 тонн накопичених відходів, то в 1990 р. – 318 тонн, у 2004 р. – 533 тонни, у 2008 р. – понад 670 тонн [20].

Отже, щорічне утворення відходів в Україні – 350 млн тонн, з них побутових відходів – 11–14 млн тонн. Причому утворення побутових відходів варіюється у діапазоні 220–450 кг на душу населення на рік.

Обсяг пластику у побутових відходах України. Дані щодо відсотка пластику у побутових відходах країни значно різняться. За даними [10], 30 % від твердих побутових відходів складають пляшки, пластикові упаковки, целофанові пакети, одноразовий посуд тощо. За іншими даними [21], пластмаси складають 1,5–5 % міських твердих побутових відходів. У [22] стверджується, що пластикові відходи складають 18–20 % від ТПВ. За даними ж [23], пластикові відходи перехідних країн, таких як Україна, складають 12 %, що підтверджується аналізом морфологічного складу ТПВ 5-ти міст України за 2019 рік: полімери в середньому складають 12,9 % та коливаються у діапазоні 8–17 %. В Україні щорічно утворюється біля 6 млн т полімерних відходів [11]. За даними [24], відходи полімерів складають 10 %. А за [9, 23], ця цифра складає 15 %. За даними ж [8], полімери складають лише 0,6 % від ТПВ. За даними Шостого національного повідомлення України з питань зміни клімату, полімери складають 9–13 % від загального обсягу побутових відходів.

Приріст використання пластикової продукції складає 10–15 % [24] на рік. За даними [25], великі населені пункти виробляють понад 200 000 одиниць пластикових відходів.

Обсяг поліетилену у побутових відходах України. Частину обсягу пластикових відходів складають поліетиленові відходи. Класифікація поліетиленових відходів наступна [22]:

- ПВЩ (PEHD) – поліетилен високої щільності – труби, пляшки, іграшки, паливні баки;
- ПНЩ (PELD) – поліетилен низької щільності – мішки, плівки, гнучкі контейнери, пакети;
- ПЕТ – поліетилентерефталат – харчові упаковки, килими, тара;
- поліпропілен (PP) – харчові контейнери, автодеталі, ящики.

РЕТ-пляшки. За даними [14], в Україні щорічно утворюються відходи з 800 млн РЕТ-пляшок. З котрих переробляється лише 3 %, тобто 24 млн РЕТ-пляшок.

РЕТ-пляшки мають наступну вагу [26]:

- 0,25 л – 24–27 грамів;
- 0,33 л – 21–24 грами;
- 0,5 л – 24–28 грамів;

- 1 л – 33–36 грамів;
- 1,5 л – 36–42 грами;
- 2 л – 42–45 грамів;
- 5 л – 91 грам;
- 10 л – 157 грамів.

Враховуючи вищенаведені дані, оцінимо вагу перероблених PET-пляшок в Україні та тих, що залишаються неутилізованими.

Перероблені PET-пляшки становлять діапазон від $24 \text{ млн} \cdot 25 \text{ г} = 0,6 \text{ тис. т/рік}$ до $24 \text{ млн} \cdot 157 \text{ г} = 3,8 \text{ тис. т/рік}$. В середньому переробляється 2,2 тис. тонн PET-пляшок на рік.

776 млн PET-пляшок залишаються неутилізованими, за вагою це становить від $776 \text{ 000 000} \cdot 25 \text{ г} = 19,4 \text{ тис. т/рік}$ до $776 \text{ 000 000} \cdot 157 \text{ г} = 121,8 \text{ тис. т/рік}$. Отже, в середньому в Україні утворюється 70,6 тис. тон відходів PET-пляшок на рік.

Пластикові пакети. Щороку кожен українець використовує близько 500 пластикових пакетів [27]. Середня вага поліетиленового пакета становить 34 г [28] та, за даними Світового банку, кількість населення в Україні станом на 2022 рік складала 38 млн [29], отже кількість утворених відходів від пластикових пакетів становить: $500 \cdot 34 \text{ г} = 17 \text{ 000 г} = 17 \text{ кг}$ на людину/рік. $17 \text{ кг} \cdot 38 \text{ млн жителів (2022 рік)} = 646 \text{ тис. тонн}$ відходів поліетиленових пакетів утворюється в Україні щороку.

З іншого боку, в Україні щороку утворюється 14 млн тонн побутових відходів, з котрих 30 % складають поліетиленові відходи (пляшки, пластикові упаковки, целофанові пакети, одноразовий посуд тощо), та лише 3 % всього обсягу відходів йде на переробку [10]. Тобто з 14 млн тонн побутових відходів лише 0,42 млн тонн (3 %) йде на переробку, а інші 13,58 млн тонн залишаються неутилізованими, з них 4,1 млн тонн складають відходи поліетилену.

За іншими даними, в Україні щорічно утворюється близько 6 млн тонн полімерних відходів, майже 50 % котрих складають відходи пакування [11], а це 3 млн тонн відходів поліетилену, що на 1,1 млн тонн відрізняється від попередніх даних.

Потенціал отримання альтернативного палива від пластикових відходів

Кількість палива, яке можна отримати з пластикових відходів, залежить від використовуваного процесу. Піроліз є поширеним методом перетворення пластикових відходів на паливо та може давати значні обсяги. Дослідження показують, що піроліз може перетворити пластикові відходи на нафту до 81 %, що складається з різних компонентів, таких як парафін, ізопропіл, олефін, нафтален та ароматичні речовини, що робить його можливим джерелом палива [30]. Експерименти у [31] продемонстрували, що використання конденсатора з водяним і льодовим охолодженням із піролізом може призвести до різного виходу нафти у діапазоні від 130 мл до 600 мл залежно від методу та умов охолодження з 1 кг пластику. Інші дослідження показали, що очищення олії з пластикових відходів може призвести до виходу рідини до 70,6 % при 460°C із змінною калорійністю та хімічним складом на основі температури та методів попередньої обробки [32]. За даними [33], з пластикових відходів можливо отримати до 94 % палива.

Отже, залежно від типу пластику, що підлягає піролізу, можливо отримати від 30 % до 95 % палива. Це значить, що з 10 тонн пластикових відходів можливо отримати від 3 до 9,5 тонн палива [34]. Тобто, в середньому, з 1 тонни пластику можливо отримати 600 кг палива, що підтверджується також даними з [35].

Потенціал отримання палива від пластику розраховується за формулою 1.

$$N_{nn} = N_n \cdot k_{nn}, \quad (1)$$

де N_{nn} – кількість отриманого палива від відпрацьованого пластику, тис. т/рік; N_n – кількість утвореного пластику, тис. т/рік; k_{nn} – коефіцієнт перетворення пластику у паливо, в.о.

Потенціал отримання альтернативного палива від відходів поліетилену

Піролізом поліетиленових відходів можна отримати значну кількість палива. Дослідження показали, що піроліз поліетиленових відходів, таких як поліетиленові (PE) пакети для транспортування, поліетилен низької щільності (LDPE) і поліетилен високої щільності (HDPE), може призвести до значного виробництва палива. Наприклад, в експериментах з відходами поліетиленових пакетів вихід мазуту досягав 59,3 % при 500°C [36]. Подібним чином перетворення пластмас LDPE та HDPE у піролізне рідке паливо (PLF) призвело до високого виходу – 50,3 % та 77,0 % відповідно [37]. Авторам [38] вдалось досягти максимального виходу палива з відходів HDPE – 79 %, використовуючи каталітичний піроліз. За даними [39], з 1 кг поліетиленів типу HDPE, LDPE, PP можна отримати 602–720 мл сирої нафти. Вихід дизеля має наступні показники: HDPE 72 %, LDPE 70 %, PP 60 %. Крім того, експерименти з пластиковими відходами, такими як пляшки від мінеральної води (PP) і поліетиленові пакети (LDPE), продемонстрували, що 1 кг сировини може давати 0,863–0,908 кг палива з теплотворною здатністю 44,6–46 МДж/кг [40]. Отже, коефіцієнт перетворення поліетиленових відходів у паливо складає приблизно 50–90 %, що в середньому становить 70 %.

2.2 Відходи зношених шин

Відходи зношених шин у світі. За даними [12, 41], у світі щорічно утворюється понад 1 млрд спрацьованих пневматичних шин, при цьому тільки в Європі – близько 2 млн тонн, у США – 2,8 млн тонн, проте утилізуванню піддається лише 10 % від загальної кількості. За даними [42], в Європі кожного року накопичується понад 2,5 млн тонн старих автомобільних шин, ці дані близькі до значень у [12, 41].

Відходи зношених шин в Україні. В Україні, станом на 2022 рік, обсяг зношених шин перевищив 10 млн тонн, а щорічно в країні їх утворюється до 0,4 млн тонн (400 тис. тонн), проте утилізуванню піддається лише 10 % спрацьованих автомобільних шин [12], тобто щороку 360 тис. тонн шин залишаються неутілізованими.

За іншими даними, обсяги утворення зношених шин в Україні дещо менші і становлять від 250 до 300 тис. тонн щороку [18], проте дані щодо відсотка переробки цих відходів підтверджують дані з [12] та становлять 10 %. Тобто 225–360 тис. тонн зношених шин щороку залишаються неутілізованими.

До того ж, за даними [43], на початку 2011 року в структурі автопарку України було наявно близько 2,1 млн легкових автомобілів 1985 року виробництва. Враховуючи те, що середня вага колеса легкового автомобіля становить 8 кг, в Україні утворилось $2,1 \text{ млн} \cdot 4 \text{ колеса} \cdot 8 \text{ кг} = 67,2 \text{ тис. тонн}$ відходів зношених шин від автомобілів 1985 року виробництва.

Причому загальна кількість зареєстрованих транспортних засобів в Україні з кожним роком збільшується в середньому на 6,57 % (табл. 1).

Таблиця 1. Кількість зареєстрованих транспортних засобів в Україні, тис. од. [18]

Рік	2010	2012	2014	2016	2017	Відсоток збільшення, %
Вантажні автомобілі	945	1249	1714	2352	3228	+37,25
Пасажирські автобуси	172	250	347	481	668	+38,89
Легкові автомобілі	6769	6901	8488	10440	12841	+23,14
Мототранспорт	528	841	860	879	899	+2,31

Згідно зі статистичними даними, щороку в Україні з експлуатації виводиться від 100 до 200 тисяч машин [44].

Потенціал отримання альтернативного палива від зношених шин

Так само як пластик, зношені шини також можуть слугувати джерелом отримання палива. У результаті піролізу зношених шин утворюються речовини, близькі за складом до продуктів крекінгу нафти, що є цінною хімічною та енергетичною сировиною. Піроліз зношених шин відбувається за відсутності або при обмеженому доступі кисню за температури 500–1000°C [45]. За даними [46], залежно від типу шин, шляхом піролізу, можливо отримати паливо з коефіцієнтом від 30 % до 45 %. За даними [47] – 33–47 %. Дослідникам у [48] вдалось досягти виходу палива з ефективністю 38,7 % з кілограма зношених шин (з вмістом вуглеводнів у рідких продуктах 80,94 % C5-C12 (бензинова фракція). Близьке значення у 35 % отримано переробкою шин шляхом піролізу [49], отриманими продуктами є газ, рідка фракція та сажа. Автори [50] отримали вихід дизельного палива у 47 мас. % та мазуту у 10 мас. %. Схожі значення отримано в [51]: 42 % (мас.) без каталізатора, 36,67 % (мас.) з каталізатором. Аналогічно [52] стверджують, що ефективність переробки зношених шин складає близько 50 % в діапазоні температур 673–773 К.

Отже, дослідження показали, що піроліз зношених шин може призвести до виходу рідкого палива в діапазоні від 30 % до 50 % залежно від умов процесу, таких як температура, використовувані каталізатори та час реакції.

Тобто з 1 тонни відпрацьованих шин можна отримати 300–500 кг палива. Потенціал отримання палива від зношених шин розраховується за формулою 2.

$$N_{\text{шн}} = N_{\text{ш}} \cdot k_{\text{шн}}, \quad (2)$$

де $N_{\text{шн}}$ – кількість отриманого палива від зношених шин, тис. т/рік; $N_{\text{ш}}$ – кількість утворених зношених шин, тис. т/рік; $k_{\text{шн}}$ – коефіцієнт перетворення зношених шин у паливо, в.о.

3. Результати

За результатами дослідження встановлено наступне.

Щорічне утворення відходів в Україні – 350 млн тонн, з них побутових відходів – 11–14 млн тонн. Причому утворення побутових відходів варіюється у діапазоні 220–450 кг на душу населення на рік.

За різними даними, обсяг **пластику** у твердих побутових відходах складає від 0,6 до 30 %. За аналізом морфологічного складу відходів 5-ти міст України, пластик складає в середньому 12,9 % від побутових відходів, що підтверджує статистику кількості полімерів у побутових відходах перехідних країн та дані Шостого національного повідомлення України з питань зміни клімату і є найбільш вірогідними даними.

Мінімальний обсяг пластикових відходів знаходиться у діапазоні: від $0,09 \cdot 11$ млн т/рік = 990 тис. т/рік до $0,09 \cdot 14$ млн тонн = 1260 тис. т/рік.

Максимальний обсяг пластикових відходів: від $0,13 \cdot 11$ млн т/рік = 1430 тис. т/рік до $0,13 \cdot 14$ млн т/рік = 1820 тис. т/рік.

Отже, обсяг пластикових відходів, що утворюються в Україні щороку, становить від 990 тис. т/рік до 1820 тис. т/рік, що в середньому складає 1405 тис. т/рік. На душу населення це складає від 26,1 кг/рік до 47,9 кг/рік, а в середньому – 36,9 кг/рік.

Розрахуємо потенціал отримання палива з пластикових відходів за формулою 1:

мінімальний обсяг палива, що можна отримати від пластикових відходів, становить від $N_{\text{пп}} = 990 \cdot 0,3 = 297$ тис. т/рік до $N_{\text{пп}} = 990 \cdot 0,95 = 940,5$ тис. т/рік;

середній обсяг палива, що можна отримати від пластикових відходів, становить від $N_{\text{пп}} = 1405 \cdot 0,3 = 421,5$ тис. т/рік до $N_{\text{пп}} = 1405 \cdot 0,95 = 1334,75$ тис. т/рік;

максимальний обсяг палива, що можна отримати від пластикових відходів, становить від $N_{\text{пп}} = 1820 \cdot 0,3 = 546$ тис. т/рік до $N_{\text{пп}} = 1820 \cdot 0,95 = 1729$ тис. т/рік.

За оцінками частки **поліетиленових** відходів у побутових відходах, щороку неутилізованими залишаються 3–4,1 млн т/рік відходів поліетилену. З них в середньому 70,6 тис. т/рік складають PET-пляшки та 285–646 тис. т/рік – поліетиленові пакети.

Розрахуємо потенціал отримання палива з поліетиленових відходів за формулою 1:

мінімальний обсяг палива, що можна отримати від поліетиленових відходів, становить від $N_{mn} = 3 \cdot 0,5 = 1,5$ млн т/рік (1500 тис. т/рік) до $N_{mn} = 3 \cdot 0,90 = 2,7$ млн т/рік (2700 тис. т/рік);

середній обсяг палива, що можна отримати від поліетиленових відходів, становить від $N_{mn} = 3,55 \cdot 0,5 = 1,8$ млн т/рік (1800 тис. т/рік) до $N_{mn} = 3,55 \cdot 0,90 = 3,2$ млн т/рік (3200 тис. т/рік);

максимальний обсяг палива, що можна отримати від поліетиленових відходів, становить від $N_{mn} = 4,1 \cdot 0,5 = 2,05$ млн т/рік (2050 тис. т/рік) до $N_{mn} = 4,1 \cdot 0,90 = 3,7$ млн т/рік (3700 тис. т/рік).

В Україні утворюється 225–360 тис. тонн неутилізованих **зношених шин** щороку. Причому станом на 2022 рік обсяг неутилізованих зношених шин в Україні перевищив 10 млн тонн, з них 67,2 тис. тонн відходів від автомобілів 1985 року виробництва. Кількість зареєстрованих транспортних засобів в Україні щороку зростає.

Розрахуємо потенціал отримання альтернативного палива зі зношених шин за формулою 2:

мінімальний обсяг палива, що можна отримати від зношених шин, становить від $N_{un} = 225 \cdot 0,3 = 67,5$ тис. т/рік до $N_{un} = 225 \cdot 0,5 = 112,5$ тис. т/рік;

середній обсяг палива, що можна отримати від пластикових відходів, становить від $N_{un} = 292,5 \cdot 0,3 = 87,75$ тис. т/рік до $N_{un} = 292,5 \cdot 0,5 = 146,25$ тис. т/рік;

максимальний обсяг палива, що можна отримати від пластикових відходів, становить від $N_{un} = 360 \cdot 0,3 = 108$ тис. т/рік до $N_{un} = 360 \cdot 0,5 = 180$ тис. т/рік.

Результати оцінки потенціалу отримання альтернативного палива з пластику, поліетилену та зношених шин наведено в таблиці 2.

Таблиця 2. Потенціал отримання альтернативного палива з пластику, поліетилену та зношених шин

Тип відходів	Обсяг утворення, тис. т/рік		Коефіцієнт перетворення у паливо, в.о.	Потенціал отримання альтернативного палива тис. т/рік	
	мін.	макс.		мін.	макс.
Пластик	мін.	990–1260	0,3–0,95	мін.	297–940,5
	сер.	1405		сер.	421,5–1334,75
	макс.	1430–1820		макс.	546–1729
Поліетилен	мін.	3000	0,5–0,9	мін.	1500–2700
	сер.	3550		сер.	1800–3200
	макс.	4100		макс.	2050–3700
Зношені шини	мін.	225	0,3–0,5	мін.	67,5–112,5
	сер.	292,5		сер.	87,75–146,25
	макс.	360		макс.	108–180

На рисунку 1 наведена феноменологічна модель отримання альтернативного моторного палива з відходів пластику, поліетилену та зношених шин. Ці відходи, що надходять на вхід системи, перетворюючись у компоненти моторного палива, створюють енергетичний потенціал отримання альтернативного моторного палива в Україні, підвищуючи енергетичну та екологічну безпеки України.

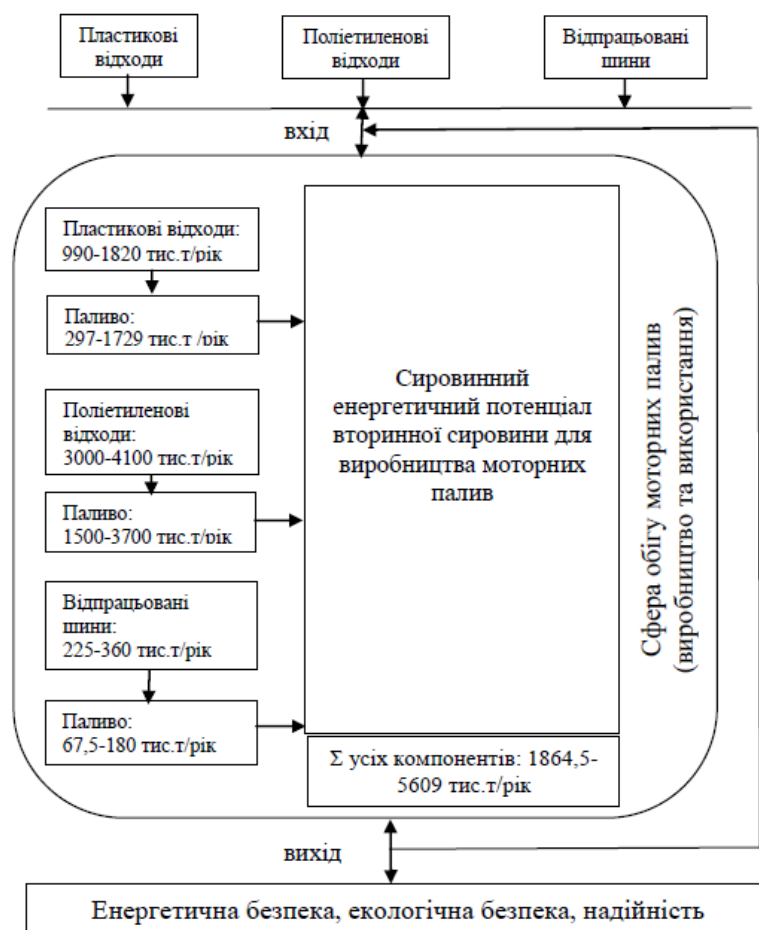


Рисунок 1. Феноменологічна модель отримання альтернативного моторного палива з пластику, поліетилену та зношених шин

Як відомо [53], основними методами утилізації полімерних і гумових відходів є захоронення, спалювання, рециклінг, сольволіз (гідроліз, гліколіз, метаноліз), конверсія (термічний піроліз, каталітичний піроліз, газифікація). Переваги та недоліки цих методів утилізації детально вказали у своїй праці автори [54]. На підставі цього зроблено висновок, що метод низькотемпературного термічного піролізу цих відходів є найбільш раціональним, оскільки він дає змогу отримувати максимальну кількість рідких вуглеводнів для одержання моторних палив і є технічно простим та порівняно з іншими недорогим.

4. Висновки

За результатами дослідження зроблено висновок, що обсяг пластикових відходів, що утворюються в Україні щороку, становить від 990 тис. т/рік до 1820 тис. т/рік, що в середньому складає 1405 тис. т/рік. Відповідно, обсяги палива, котрі можна отримати від пластикових відходів, становлять від 297 тис. т/рік до 1729 тис. т/рік. Щороку неутілізованими залишаються 3000–4100 тисяч тонн відходів поліетилену. Потенціал отримання палива з поліетиленових відходів становить від 1500 тис. т/рік до 3700 тис. т/рік. Поряд з цим в Україні утворюється 225–360 тис. тонн неутілізованих зношених шин щорічно. Потенціал отримання палива від відходів зношених шин складає від 67,5 тис. т/рік до 180 тис. т/рік. Отже, сумарний потенціал отримання моторного палива з відходів пластику, поліетилену та зношених шин складає від 1864,5 тис. т/рік до 5609 тис. т/рік та свідчить про необхідність налагодження екології цих відходів в Україні. Висунута гіпотеза підтверджена результатами цих досліджень. Також зроблено висновок, що найраціональнішим методом переробки вищенаведених відходів є низькотемпературний термічний піроліз.

Фінансування роботи. Дослідження виконуються у рамках проєкту «Розроблення технологічних рішень отримання композиційних моторних палив із вторинної сировини для підвищення енергетичної безпеки» за рахунок державного бюджету згідно з наказом Міністерства освіти і науки України від 27.12.2023 р. № 1572 «Про затвердження переліку проєктів фундаментальних наукових досліджень, прикладних наукових досліджень, науково-технічних (експериментальних) розробок, виконавцями яких є заклади вищої освіти та наукові установи, що належать до сфери управління Міністерства освіти і науки України, які пройшли конкурсний відбір та фінансування яких розпочнеться з 2024 року за рахунок коштів Державного бюджету України» (реєстраційний номер 0124U000973).

Посилання

1. Охрей А., Чим небезпечний пластик для довкілля? *Ecogrizzly*. URL: <https://ecogrizzly.shop/dangerous-plastic/> (дата звернення: 28.10.2022).
2. Sigler M. The effects of plastic pollution on aquatic wildlife: current situations and future solutions. *Water, Air, & Soil Pollution*. 2014. Vol. 225. Iss. 11. 2184. <https://doi.org/10.1007/s11270-014-2184-6>
3. Halden R. U. Plastics and health risks. *Annual review of public health*. 2010. Vol. 31. P. 179—194. <https://doi.org/10.1146/annurev.publhealth.012809.103714>
4. Беш Д. Терміни розкладання сміття на Землі. URL: <https://ocheninteresno.com/uk/interesting-facts/facts-of-nature/terms-of-decomposition-of-garbage-on-earth/> (дата звернення: 01.11.2022).
5. Бойченко С.В., Іванченко О.В., Казимір Л., Фролов В.Ф., Яковлева А.В. Екологістика, рециклінг і утилізація транспорту: навчальний посібник. За ред. проф. С.В. Бойченка. Київ: НАУ, 2019. 266 с.
6. Цілі сталого розвитку: Україна: Національна доповідь 2017. Міністерство економічного розвитку і торгівлі України. 2017. 174 с. URL: <https://www.undp.org/uk/ukraine/publications/цілі-сталого-розвитку-національна-довідь-2017> (дата звернення: 20.02.2024).
7. Герасимчук В.Г. Стратегія використання пластику у циркулярній економіці: розвиток бізнесу, скорочення відходів. *Економічний вісник НТУУ «КПІ»*. 2019. № 16. С. 31—41. <https://doi.org/10.20535/2307-5651.16.2019.181406>
8. Михайлова Є.О., Панчева Г.М., Резніченко Г.М.. Ефективні механізми поводження з твердими побутовими відходами в Україні. *Виробництво та технології. Технології захисту навколишнього середовища*. 2019. № 5(151). С. 37—44.
9. Соколова С.М., Колеснікова К.С. Шляхи утилізації полімерних відходів. V Міжнародна науково-практична конференція «Економічні, екологічні та соціальні проблеми вугільних регіонів СНД»: матеріали конференції. Краснодар: Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля, 2012. С. 70—71.
10. Коломієць Т.М., Караваєв Т.А., Глушкова Т.Г. Полімерні відходи: проблеми накопичення та вторинної переробки. *Вісник Львівського торговельно-економічного університету. Технічні науки*. 2021. № 26. С. 86—94. <https://doi.org/10.36477/2522-1221-2021-26-12>
11. Поповкін І.А., Власенко А.О. Можливості впровадження рециклінгу полімерних відходів в закладах освіти. Наукові розробки молоді на сучасному етапі. XVIII Всеукраїнська наукова конференція молодих вчених та студентів: тези доповідей (Київ, 18—19 квітня 2019 р.). Т. 2: Мехатронні системи і комп'ютерні технології. Ресурсозбереження та охорона навколишнього середовища. Київ: КНУТД, 2019. С. 559—560. URL: <https://er.knutt.edu.ua/handle/123456789/14044> (дата звернення: 04.07.2024).
12. Мікульонюк І.О. Поводження з полімер-, скло- і металовмісними побутовими відходами: монографія. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022. 112 с.
13. Луценко В.В., Хаєцький Г.С. Екологічні підходи до рециклінгу відходів поліетиленерефталатових пляшок. *Еколого-збалансований розвиток суспільства: стан, проблеми, перспективи*: збірник матеріалів конференції. 2022. Вип. 4. С. 155—159. URL: <https://docs.academia.vn.ua/handle/123456789/1084> (дата звернення: 04.07.2024).
14. Лупинос А.В., Гужій Н.М. Аналіз тенденцій розвитку підприємницької діяльності в галузі утилізації полімерних відходів в Україні. *Менеджмент та підприємництво: тренди розвитку*. 2018. № 2(04). С. 55—63. <https://doi.org/10.26661/2522-1566-2018-2/04-06>
15. Книжник К.В. Проблеми і напрямки утилізації відходів в Україні. *Молодий вчений*. 2018. № 5(57). С. 608—611.
16. Решетніков В.С., Мельник І.О. Забруднення побутовими відходами на Україні. *Екологічні та соціальні аспекти розвитку економіки в умовах євроінтеграції*. Всеукраїнська науково-практична конференція: тези доповідей (Миколаїв, 15—17 травня 2019 р.). За ред. І.О. Мельник та ін. С. 79—82. URL: https://www.mnau.edu.ua/files/nauk_prof_konf_zbirnyk_tez_15-17_05_19.pdf (дата звернення: 04.07.2024).
17. Ющенко Н. Економіко-математичний інструментарій планування розвитку та розміщення підприємств із переробки сміття в Україні. *Проблеми і перспективи економіки та управління*. 2019. № 1(17). С. 96—106. [https://doi.org/10.25140/2411-5215-2019-1\(17\)-96-106](https://doi.org/10.25140/2411-5215-2019-1(17)-96-106)

18. Сербінова Л.А. Дослідження проблем поводження з відходами зношених автомобільних шин в Україні. *Проблеми охорони праці в Україні*. 2019. № 35(1). С. 15—19. <https://doi.org/10.36804/nndipbop.35-1.2019.15-19>
19. Гармаш С.М., Нескоромна А.Є. Екологічна безпека промислових міст України. Третя міжнародна науково-практична конференція «Відновлення біотичного потенціалу агроєкосистем»: матеріали конференції. Дніпро: «Роял Принт», 2018. С. 104—106.
20. Стройко Т.В., Ланецький А.А., Кишковська О.Л., Терлецька А.М. Інноваційні аспекти переробки відходів в контексті сталого розвитку регіонів України. *Вісник ХНАУ ім. В.В. Докучаєва. Серія «Економічні науки»*. 2020. № 4. Т. 1. С. 300—311.
21. Федорова Ю.І., Чупріна М.О. Проблеми і напрямки утилізації відходів в Україні та світі. *Актуальні проблеми економіки та управління*. 2017. № 11. URL: <http://ape.fmm.kpi.ua/issue/view/6116> (дата звернення: 27.05.2024).
22. Пташніченко Т.В. Актуальні проблеми поводження з полімерними відходами в Україні. *Екологічна безпека держави*. XIV Всеукраїнська науково-практична конференція молодих учених і студентів: тези доповідей. Київ: НАУ, 2020. С. 102—103.
23. Токарчук Д.М., Березюк С.В. Сортуння, логістика й вторинне використання твердих побутових відходів України. *Економіка, фінанси, менеджмент: актуальні питання науки і практики*. 2022. № 1. С. 20—37. <https://doi.org/10.37128/2411-4413-2022-1-2>
24. Антіпов С.А. Стратегія поводження з відходами із пластику в межах Стрижавської селищної територіальної громади: магістерська кваліфікаційна робота. Комунальний заклад вищої освіти «Вінницька академія безперервної освіти», 2023. URL: <https://docs.academia.vn.ua/bitstream/handle/123456789/1490/%D0%90%D0%BD%D1%82%D1%96%D0%BF%D0%BE%D0%B2%20%D0%A1%D1%82%D0%B0%D0%BD%D1%96%D1%81%D0%BB%D0%B0%D0%B2%20%D0%90%D0%BD%D0%B4%D1%80%D1%96%D0%B9%D0%BE%D0%B2%D0%B8%D1%87.pdf?sequence=1&isAllowed=y> (дата звернення: 27.05.2024).
25. Зоценко М.Л., Михайловська О.В., Черніков В.О. Дослідження використання пластикових відходів при будівництві дамб та насипів. *Грааль науки*. 2023. № 24. С. 797—799. <https://doi.org/10.36074/grail-of-science.17.02.2023.148>
26. До речі, а ви знаєте, скільки важить ПЕТ-пляшка? *Україна БЕЗ сміття*. URL: <https://www.facebook.com/NowasteUkraine/posts/1907376612845396/> (дата звернення: 27.05.2024).
27. Липницька Є.О., Довгань Б.В. Державна політика у сфері використання пластику в Україні: правовий аспект. *Юридичний науковий електронний журнал*. 2021. № 10. С. 300—303. <https://doi.org/10.32782/2524-0374/2021-10/76>
28. Пакет поліетиленовий 55x110x30. Вага 34 грм. *PACKMAN*. URL: https://pack-man.com.ua/bag_55_110_30 (дата звернення: 27.05.2024).
29. Population, total — Ukraine. *THE WORLD BANK*. URL: <https://data.worldbank.org/indicator/SP.POP.TOTL?locations=UA> (дата звернення: 27.05.2024).
30. Sari G. L. Kajian potensi pemanfaatan sampah plastik menjadi bahan bakar cair. *Al-Ard: Jurnal Teknik Lingkungan*. 2017. Vol. 3. Iss. 1. P. 6—13. <https://doi.org/10.29080/alard.v3i1.255>
31. Putra B. P., Putra W. T., Fadelan, Sudarno, Winardi Y. Pengaruh pendingin air dan es terhadap hasil pirolisis minak plastik. *KOMPUTEK*. 2022. Vol. 6. Iss. 2. P. 11—20. <https://doi.org/10.24269/jkt.v6i2.1477>
32. Fulgencio-Medrano L., García-Fernández S., Asueta A., Lopez-Uriónabarrenechea A., Perez-Martinez B. B., Arandes J. M. Oil Production by Pyrolysis of Real Plastic Waste. *Polymers*. 2022. Vol. 14. Iss. 3. 553. <https://doi.org/10.3390/polym14030553>
33. Al-Salem S. M., Yang Y., Wang J., Leeke G. A. Pyro-oil and wax recovery from reclaimed plastic waste in a continuous Auger pyrolysis reactor. *Energies (MDPI AG)*. 2020. Vol. 13. Iss. 8. 2040. <https://doi.org/10.3390/en13082040>
34. How much oil can be produced from 10 tons of waste plastic? *Henan doing environmental protection technology co., LTD*. URL: http://www.bestpyrolysisplant.com/FAQ/Plastic_to_Fuel_Machine/how_much_oil_can_be_produced_from_10_to_ns_of_waste_plastic144.html (дата звернення: 28.10.2022).
35. How much fuel oil can be extracted from 1T of waste plastics? *Xinxiang Doing Renewable Energy Equipment Co., Ltd*. URL: <http://www.china-doing.com/faqshow.asp?id=547&mnid=150&classname=pyrolysisplanttechnology#:~:text=Generally%20speakin g%2C%201T%20plastic%20can%20getabout%20600KG%20of%20pyrolysis%20oil> (дата звернення: 01.11.2022).
36. Saroj K., Pragati G., Nerisha T. Production of fuels by pyrolysis of waste plastics: technical notes. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2023. Vol. 1279. Iss. 1. 012008. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1279/1/012008>
37. Suhartono, Ate R., Harsanti M., Suharto, Achmad F. Characteristics study of liquid fuel from pyrolysis of polyethylene plastic waste. *Jurnal Teknologi*. 2022. Vol. 84. Iss. 4. P. 57—64. <https://doi.org/10.11113/jurnalteknologi.v84.17517>

38. Sachin K., Singh R. K. Conversion of waste high-density polyethylene into liquid fuels: A Thesis Submitted in Partial Fulfillment for the Award of the Degree of Doctor of Philosophy in Chemical Engineering. India: Department of Chemical Engineering National Institute of Technology Rourkela-769008, 231 p.
39. Mburu J. N., Njogu P. M., Muthengia J. W. Pyrolysis Process Studies for Post Consumer Polyethene waste conversion and Upgrading of The Pyrolysis oil. The 2015 JKUAT Scientific Conference. Nairobi, Kenya, 2015. P. 87—95.
40. Alit I. B., Susana G. B., Mara M. Conversion of LDPE and PP plastic waste into fuel by pyrolysis method. *Global Journal of Engineering and Technology Advances*. 2022. Vol. 10. Iss. 3. P. 73—78. <https://doi.org/10.30574/gjeta.2022.10.3.0055>
41. Мікульонок І.О. Стан та перспективи поводження з пневматичними шинами, що втратили свої споживчі властивості (Огляд). *Енерготехнології та ресурсозбереження*. 2021. № 3. С. 63—83. <https://doi.org/10.33070/etars.3.2021.06>
42. Несміян М.О., Бабушкіна Р.О. Дослідження утилізації відпрацьованих автомобільних шин в Україні. *Роль наук про землю в народному господарстві: стан і перспективи*. Матеріали II-ї міжнародної науково-практичної конференції. Херсон: ХДАЕУ, 2020. С. 154—157. URL: https://www.ksau.kherson.ua/files/konferencii/%D0%97%D0%B1%D1%96%D1%80%D0%BA%D0%B0_%D1%82%D0%B5%D0%B7_%D0%B3%D0%BE%D1%82%D0%BE%D0%B2%D0%B0%D1%8F_250420.pdf (дата звернення: 04.07.2024).
43. Волков В.П., Внукова Н.В., Позднякова О.І., Волкова Т.В., Кужель В.П., Віштак І.В. Методологічні основи підготовки фахівців з впровадження системи рециклінгу автомобілів в Україні. *Вісник Вінницького політехнічного інституту*. 2023. № 3. С. 90—99. <https://doi.org/10.31649/1997-9266-2023-168-3-90-99>
44. Агулі М. Сучасний стан та можливі шляхи поводження з відпрацьованими автомобілями в Україні і Тунісі: магістерська кваліфікаційна робота. Одеса: Одеський державний екологічний університет, 75 с.
45. Основи енерготехнологій в екологістичному аспекті [Електронний ресурс]: навчальний посібник для здобувачів освітніх ступенів «Бакалавр», «Магістр» за освітніми програмами «Енергетичний менеджмент та інжиніринг теплоенергетичних систем», «Інжиніринг інтелектуальних електротехнічних та мехатронних комплексів» спеціальностей 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка», 144 «Теплоенергетика». КПІ ім. Ігоря Сікорського. Уклад.: Бойченко С.В., Максименко О.Е., Яковлева А.В., Хрутьба В.О., Зюсюн В.І., Данілін О.В. Електронні текстові дані (1 файл: 6.33 МБ). Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022. 229 с.
46. How much oil can be obtained from 1 ton of waste tires? *Henan doing environmental protection technology co., LTD*. URL: http://www.bestpyrolysisplant.com/FAQ/how_much_oil_can_be_obtained_from_1_ton_of_waste_tires_156.html (дата звернення: 01.11.2022).
47. Yaqoob H., Teoh Y. H., Sher F., Jamil M. A., Murtaza D., Al Qubeissi M., UI Hassan M., Mujtaba M. A. Current Status and Potential of Tire Pyrolysis Oil Production as an Alternative Fuel in Developing Countries. *Sustainability*. 2021. Vol. 13. Iss. 6. 3214. <https://doi.org/10.3390/su13063214>
48. Arahim A. A., Widayat, Hadiyanto. Liquid fuel production from motorized vehicle tires with pirolysis process. *AIP Publishing*. 2020. Vol. 2296. Iss. 1. 020004. <https://doi.org/10.1063/5.0030380>
49. Pyshiev S.V., Lipko Yu.V., Shlyakhova A.O., Korchak B.A. The obtaining and studying of the composition of car tire based liquid pyrolysis products. *Uglehimičeskij žurnal*. 2022. Vol. 1. P. 21—28. <https://doi.org/10.31081/1681-309x-2022-0-1-21-28>
50. Vasileva E.V., Nevedrov A.V., Subbotin S.P., Cherkasova T.G., Papin A.V. Liquid Product in the Pyrolysis of Discarded Tires. *Coke and Chemistry (Pleiades Publishing)*. 2019. Vol. 62. Iss. 9. P. 416—418. <https://doi.org/10.3103/S1068364X19090114>
51. Hossain M. S., Rahman A. N. M. M. Catalytic Pyrolysis of Tire Wastes for Liquid Fuel. *Iranica Journal of Energy and Environment*. 2017. Vol. 8. Iss. 1. P. 88—94. URL: https://www.ijee.net/article_64668.html (дата звернення: 04.07.2024).
52. Rijo B., Dias A. P. S., Wojnicki Ł. Catalyzed pyrolysis of scrap tires rubber. *Journal of environmental chemical engineering*. 2022. Vol. 10. Iss. 1. P. 107037—107037. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2021.107037>
53. Гринишин К.О., Скорохода В.Й., Червінський Т.І. Склад і властивості піроконденсату піролізу зношених автомобільних шин. *Хімія, технологія речовин та їх застосування*. 2021. № 4(2). С. 28—32. <https://doi.org/10.23939/ctas2021.02.028>
54. Гринишин К.О., Скорохода В.Й., Червінський Т.І. Поліетиленові відходи – сировина для одержання компонентів моторних палив. *Хімія, технологія речовин та їх застосування*. 2023. № 6(2). С. 55—60. <https://doi.org/10.23939/ctas2023.02.055>

References

1. Okhrei, A. Chym nebezpečnyy plastyk dlia dovkillia? *Ecogrizzly*. URL: <https://ecogrizzly.shop/dangerous-plastic/> (Last accessed: 28.10.2022) [in Ukrainian].
2. Sigler, M. (2014). The effects of plastic pollution on aquatic wildlife: current situations and future solutions. *Water, Air, & Soil Pollution*, 225(11), 2184. <https://doi.org/10.1007/s11270-014-2184-6>

3. Halden, R. U. (2010). Plastics and health risks. *Annual review of public health*, 31, 179–194. <https://doi.org/10.1146/annurev.publhealth.012809.103714>
4. Besh, D. Terminy rozkladannia smittia na Zemli. URL: <https://ocheninteresno.com/uk/interesting-facts/facts-of-nature/terms-of-decomposition-of-garbage-on-earth/> (Last accessed: 01.11.2022) [in Ukrainian].
5. Boichenko, S.V., Ivanchenko, O.V., Kazymir, L., Frolov, V.F., & Yakovlieva, A.V. (2019). *Ekolohistyka, retsyklinh i utylizatsiia transport* [Navchalnyi posibnyk]. In S.V. Boichenko (Ed.). Kyiv: NAU (266 p.) [in Ukrainian].
6. Sustainable development goals: Ukraine. (2017). National report. Ministry of Economic Development and Trade of Ukraine. UNDP. URL: <https://www.undp.org/uk/ukraine/publications/цїлі-сталого-розвитку-національна-дповідь-2017> (Last accessed: 20.02.2024) [In Ukrainian].
7. Herasymchuk, V.G. (2019). Strategy for plastics in the circular economy: boosting business, reducing waste. *Economic Bulletin of National Technical University of Ukraine "Kyiv Polytechnical Institute"*, 16, 31–41 [in Ukrainian].
8. Mykhailova, Ye.O., Pancheva, H.M., & Reznynchenko, H.M. (2019). Effective mechanisms of municipal solid waste management in Ukraine. *Vyrobnytstvo ta tekhnolohii. Tekhnolohii zakhystu navkolyshnoho seredovyshcha*, 5(151), 37–44 [in Ukrainian].
9. Sokolova, S.M., & Kolesnikova, K.S. (2012). Ways of recycling polymer waste. Proceedings of the V mizhnarodna naukovo-praktychna konferentsiia "Ekonomichni, ekolohichni ta sotsialni problemy vuhilnykh rehioniv SND" [Materialy konferentsii]. Krasnodon: Skhidnoukrainskyi natsionalnyi universytet imeni Volodymyra Dalia, 70–71 [in Ukrainian].
10. Kolomiets, T.M., Karavayev, T.A., & Glushkova, T.G. (2021). Polymeric waste: accumulation and recycling problems. *Herald of Lviv University of Trade and Economics. Technical Sciences*, 26, 86–94 [in Ukrainian]. <https://doi.org/10.36477/2522-1221-2021-26-12>
11. Popovkin, I.A., & Vlasenko, A.O. (2019, April 18–19). Opportunities for the implementation of polymer waste recycling in educational institutions. Naukovi rozrobky molodi na suchasnomu etapi: tezy dopovidei XVIII Vseukrainskoi naukovo konferentsii molodykh vchenykh ta studentiv. T. 2: Mekhatronni systemy i kompiuterni tekhnolohii. Resursozberezhennia ta okhorona navkolyshnoho seredovyshcha (pp. 559–560). Kyiv: KNUTD. URL: <https://er.knutd.edu.ua/handle/123456789/14044> (Last accessed: 04.07.2024) [in Ukrainian].
12. Mikulionok, I.O. (2022). Management of polymer, glass, and metal-containing household waste [Monograph]. Kyiv: Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute (112 p.) [in Ukrainian].
13. Lutsenko, V.V., & Khaietskyi, H.S. (2022). Ecological approaches to recycling polyethylene terephthalate bottle waste. *Ekoloho-zbalansovanyi rozvytok suspilstva: stan, problemy, perspektyvy* [Zbirnyk materialiv konferentsii], 4, 155–159 [in Ukrainian]. URL: <https://docs.academia.vn.ua/handle/123456789/1084> (Last accessed: 04.07.2024).
14. Lupynos, A.V., & Huzhii, N.M. (2018). Analysis of trends of development of enterprise activity in the field of polymeric waste utilization in Ukraine. *Management and Entrepreneurship: Trends of Development*, 2(04), 55–63 [in Ukrainian]. <https://doi.org/10.26661/2522-1566-2018-2/04-06>
15. Knyzhnyk, K.V. (2018). Problems and directions for waste disposal in Ukraine. *Young Scientist*, 5(57), 608–611 [in Ukrainian].
16. Reshetnikov, V.S., & Melnyk, I.O. (2019, May 15–17). Pollution by household waste in Ukraine. *Ekolohichni ta sotsialni aspekty rozvytku ekonomiky v umovakh Yevrointehratsii*. Vseukrainska naukovo-praktychna konferentsiia [Tezy dopovidei]. In I.O. Melnyk (Ed.) (pp. 79–82). Mykolaiv. URL: https://www.mnau.edu.ua/files/nauk_prof_konf/zbirnyk_tez_15-17_05_19.pdf (Last accessed: 04.07.2024) [in Ukrainian].
17. Yushchenko, N. (2019). Economic and mathematical tools for planning of development and placement of enterprises for the processing of garbage in Ukraine. *Problems and prospects of economics and management*, 1(17), 96–106 [in Ukrainian]. [https://doi.org/10.25140/2411-5215-2019-1\(17\)-96-106](https://doi.org/10.25140/2411-5215-2019-1(17)-96-106)
18. Serbinova, L.A. (2019). Study of waste management problems of worn-out car tires in Ukraine. *Labour Protection Problems in Ukraine*, 35(1), 15–19 [in Ukrainian]. <https://doi.org/10.36804/nndipbop.35-1.2019.15-19>
19. Harmash, S.M., & Neskromna, A.Ye. (2018). Environmental safety of industrial cities in Ukraine. Tretia mizhnarodna naukovo-praktychna konferentsiia «Vidnovlennia biotychnoho potentsialu ahroekosystem» [Materialy konferentsii] (pp. 104–106). Dnipro: «Roial Prynt» [in Ukrainian].
20. Stroiko, T.V., Lanetsky, A.A., Kyshkovska, O.L., & Terletska, A.M. (2020). Innovative aspects of waste processing in the context of sustainable development of Ukraine regions. *Visnyk KhNAU im. V.V. Dokuchaieva. Seriia „Ekonomichni nauky”*, 4(1), 300–311 [in Ukrainian].
21. Fedorova, Y.I., & Chupryna, M.O. (2017). Problem areas and disposal of waste in Ukraine and in the world. *Actual problems of economics and management*, 11. URL: <http://ape.fmm.kpi.ua/issue/view/6116> (Last accessed: 27.05.2024) [in Ukrainian]
22. Ptashnichenko, T.V. (2020). Actual problems of handling polymer waste in Ukraine. *Ekolohichna bezpeka derzhavy*. XIV Vseukrainska naukovo-praktychna konferentsiia molodykh uchenykh i studentiv [Tezy dopovidei] (pp. 102–103). Kyiv: NAU [in Ukrainian].

23. Tokarchuk, D.M., & Bereziuk, S.V. (2022). Sorting, logistics and secondary use of solid household waste of Ukraine. *Economics, finance, management: topical issues of science and practical activity*, 1, 20–37 [in Ukrainian]. <https://doi.org/10.37128/2411-4413-2022-1-2>
24. Antipov, S.A. (2023). *Waste management strategy for plastic waste within the Stryzhavska territorial community* [Master's qualification work]. Komunalnyi zaklad vyshchoi osvity "Vinnytska akademiia bezperervnoi osvity". URL: <https://docs.academia.vn.ua/bitstream/handle/123456789/1490/%D0%90%D0%BD%D1%82%D1%96%D0%BF%D0%BE%D0%B2%20%D0%A1%D1%82%D0%B0%D0%BD%D1%96%D1%81%D0%BB%D0%B0%D0%B2%20%D0%90%D0%BD%D0%B4%D1%80%D1%96%D0%B9%D0%BE%D0%B2%D0%B8%D1%87.pdf?sequence=1&isAllowed=y> (Last accessed: 27.05.2024) [in Ukrainian].
25. Zotcenko, M.L., Mykhailovska, O.V., & Chernikov, V.O. (2023). Research on the use of plastic waste in the construction of dams and embankments. *Grail of Science*, 24, 797–799 [in Ukrainian]. <https://doi.org/10.36074/grail-of-science.17.02.2023.148>
26. Do you know how much a PET bottle weighs? *Ukraina BEZ smittia*. URL: <https://www.facebook.com/NowasteUkraine/posts/1907376612845396/> (Last accessed: 27.05.2024) [in Ukrainian].
27. Lypnytska, Ye.O., & Dovhan, B.V. (2021). State policy in the field of plastic use in Ukraine: Legal aspect. *Juridical scientific and electronic journal*, 10, 300–303 [in Ukrainian]. <https://doi.org/10.32782/2524-0374/2021-10/76>
28. Polyethylene bag 55x110x30. Weight 34 grams. *PACKMAN*. URL: https://pack-man.com.ua/bag_55_110_30 (Last accessed: 27.05.2024) [in Ukrainian].
29. Population, total – Ukraine. *THE WORLD BANK*. URL: <https://data.worldbank.org/indicator/SP.POP.TOTL?locations=UA> (Last accessed: 27.05.2024).
30. Sari, G. L. (2017). Kajian potensi pemanfaatan sampah plastik menjadi bahan bakar cair. *Al-Ard: Jurnal Teknik Lingkungan*, 3(1), 6–13. <https://doi.org/10.29080/alard.v3i1.255>
31. Putra, B. P., Putra, W. T., Fadelan, Sudarno, & Winardi, Y. (2022). Pengaruh pendingin air dan es terhadap hasil pirolisis minak plastik. *KOMPUTEK*, 6(2), 11–20. <https://doi.org/10.24269/jkt.v6i2.1477>
32. Fulgencio-Medrano, L., García-Fernández, S., Asueta, A., Lopez-Uribebarrenechea, A., Perez-Martinez, B. B., & Arandes, J. M. (2022). Oil Production by Pyrolysis of Real Plastic Waste. *Polymers*, 14(3), 553. <https://doi.org/10.3390/polym14030553>
33. Al-Salem, S. M., Yang, Y., Wang, J., & Leeke, G. A. (2020). Pyro-oil and wax recovery from reclaimed plastic waste in a continuous Auger pyrolysis reactor. *Energies (MDPI AG)*, 13(8), 2040. <https://doi.org/10.3390/en13082040>
34. How much oil can be produced from 10 tons of waste plastic? *Henan doing environmental protection technology co., LTD.* URL: http://www.bestpyrolysisplant.com/FAQ/Plastic_to_Fuel_Machine/how_much_oil_can_be_produced_from_10_to_100_tons_of_waste_plastic144.html (Last accessed: 28.10.2022).
35. How much fuel oil can be extracted from 1T of waste plastics? *Xinxiang Doing Renewable Energy Equipment Co., LTD.* URL: <http://www.china-doing.com/faqshow.asp?id=547&mnid=150&classname=pyrolysisplanttechnology#:~:text=Generally%20speaking%2C%201T%20plastic%20can%20getabout%20600KG%20of%20pyrolysis%20oil> (Last accessed: 01.11.2022).
36. Saroj, K., Pragati, G., & Nerisha, T. (2023). Production of fuels by pyrolysis of waste plastics: technical notes. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 1279(1), 012008. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1279/1/012008>
37. Suhartono, Ate, R., Harsanti, M., Suharto, & Achmad, F. (2022). Characteristics study of liquid fuel from pyrolysis of polyethylene plastic waste. *Jurnal Teknologi*, 84(4), 57–64. <https://doi.org/10.11113/jurnalteknologi.v84.17517>
38. Kumar, S., & Singh, R. K. Conversion of waste high-density polyethylene into liquid fuels: A Thesis Submitted in Partial Fulfillment for the Award of the Degree of Doctor of Philosophy in Chemical Engineering. India: Department of Chemical Engineering National Institute of Technology Rourkela-769008 (231 p.).
39. Mburu, J. N., Njogu, P. M., & Muthengia, J. W. Pyrolysis Process Studies for Post Consumer Polyethene waste conversion and Upgrading of The Pyrolysis oil. The 2015 JKUAT Scientific Conference (pp. 87–95). Nairobi, Kenya.
40. Alit, I. B., Susana, G. B., & Mara, M. (2022). Conversion of LDPE and PP plastic waste into fuel by pyrolysis method. *Global Journal of Engineering and Technology Advances*, 10(3), 3–78. <https://doi.org/10.30574/gjeta.2022.10.3.0055>
41. Mikulionok, I.O. (2021). A state of art and prospects of used pneumatic tires management (Review). *Energy Technologies & Resource Saving*, 3, 63–83 [in Ukrainian]. <https://doi.org/10.33070/etars.3.2021.06>
42. Nesmyan, M.O., & Babushkina, R.O. (2020, March 20). Research on the recycling of used car tires in Ukraine. *Rol nauk pro zemlyu v narodnomu hospodarstvi: stan i perspektyvy*. Materialy II-i mizhnarodnoi naukovo-praktychnoi konferentsii (pp. 154–157). Kherson: KhDAEU. URL: <https://www.ksau.kherson.ua/files/konferencii/%D0%97%D0%B1%D1%96%D1%80%D0%BA%D0%B0%D1>

%82%D0%B5%D0%B7_%D0%B3%D0%BE%D1%82%D0%BE%D0%B2%D0%B0%D1%8F_250420.pdf
(Last accessed: 04.07.2024) [in Ukrainian].

43. Volkov, V.P., Vnukova, N.V., Pozdnyakova, O.I., Volkova, T.V., Kuzhel, V.P., & Vishtak, I.V. (2023). Methodological Fundamentals of Training Specialists for the Implementation of the Car Recycling System in Ukraine. *Visnyk of Vinnytsia Polytechnical Institute*, 3, 90–99 [in Ukrainian].
44. Agouili, M. (n.d.). *Current state and possible ways of handling used cars in Ukraine and Tunisia* [Master's qualification work]. Odesa: Odeskyi derzhavnyi ekolohichnyi universytet (75 p.) [in Ukrainian].
45. Boichenko, S.V., Maksymenko, O.E., Yakovlieva, A.V., Khrutba, V.O., Ziuziun, V.I., & Danilin, O.V. (2022). Basics of energy technologies in an ecological aspect [Electronic resource]: a textbook for students of the educational degrees "Bachelor", "Master" in the educational programs "Energy Management and Engineering of Thermal Energy Systems", "Engineering of Intelligent Electrical and Mechatronic Complexes" in the specialties 141 "Electrical Power Engineering, Electrical Engineering and Electromechanics", 144 "Thermal Power Engineering". Kyiv: Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute (229 p.) [in Ukrainian].
46. How much oil can be obtained from 1 ton of waste tires? *Henan doing environmental protection technology co., LTD*. URL: http://www.bestpyrolysisplant.com/FAQ/how_much_oil_can_be_obtained_from_1_ton_of_waste_tires_156.html (Last accessed: 01.11.2022).
47. Yaqoob, H., Teoh, Y. H., Sher, F., Jamil, M. A., Murtaza, D., Al Qubeissi, M., UI Hassan, M., & Mujtaba, M. A. (2021). Current Status and Potential of Tire Pyrolysis Oil Production as an Alternative Fuel in Developing Countries. *Sustainability*, 13(6), 3214. <https://doi.org/10.3390/su13063214>
48. Arahim, A. A., Widayat, & Hadiyanto. (2020). Liquid fuel production from motorized vehicle tires with pirolysis process. *AIP Publishing*, 2296(1). 020004. <https://doi.org/10.1063/5.0030380>
49. Pyshiev, S.V., Lipko, Yu.V., Shlyakhova, A.O., Korchak, B.A. (2022). The obtaining and studying of the composition of car tire based liquid pyrolysis products. *Uglehimičeskij žurnal*, 1, 21–28. <https://doi.org/10.31081/1681-309x-2022-0-1-21-28>
50. Vasileva, E.V., Nevedrov, A.V., Subbotin, S.P., Cherkasova, T.G., & Papin, A.V. (2019). Liquid Product in the Pyrolysis of Discarded Tires. *Coke and Chemistry (Pleiades Publishing)*, 62(9), 416–418. <https://doi.org/10.3103/S1068364X19090114>
51. Hossain, M. S., & Rahman, A. N. M. M. (2017). Catalytic Pyrolysis of Tire Wastes for Liquid Fuel. *Iranica Journal of Energy and Environment*, 8(1), 88–94. URL: https://www.ijee.net/article_64668.html (Last accessed: 04.07.2024).
52. Rijo, B., Dias, A. P. S., & Wojnicki, Ł. (2022). Catalyzed pyrolysis of scrap tires rubber. *Journal of environmental chemical engineering*, 10(1), 107037–107037. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2021.107037>
53. Hrynshyn, K.O., Skorokhoda, V.I., & Chervinskyy, T.I. (2021). Composition and properties of pyrocondensate of pyrolysis wear tires. *Chemistry, Technology and Application of Substances*, 4(2), 28–32 [in Ukrainian]. <https://doi.org/10.23939/ctas2021.02.028>
54. Hrynshyn, K.O., Skorokhoda, V.I., & Chervinskyy, T.I. (2023). Polyethylene waste – raw material for the production of motor fuels components. *Chemistry, Technology and Application of Substances*, 6(2), 55–60 [in Ukrainian]. <https://doi.org/10.23939/ctas2023.02.055>

ANALYSIS OF THE POTENTIAL FOR PRODUCTION OF COMPOSITE MOTOR FUEL FROM WASTE PLASTICS AND POLYETHYLENE AND WASTE TIRES IN UKRAINE

Serhii Boichenko, Dr. Sci. (Engin.), Professor, <https://orcid.org/0000-0002-2489-4980>

Sofiia Zholtaily*, PhD (Engin.), <https://orcid.org/0000-0001-8136-8779>

Iryna Shkilniuk, PhD (Engin.), <https://orcid.org/0000-0002-8808-3570>

Ihor Kuberskyi, <https://orcid.org/0000-0002-3800-8484>

Ihor Levandovskyy, PhD (Chem.), Associate Professor, <https://orcid.org/0000-0002-2237-0403>

National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", 37, Beresteiskyy Prosp., Kyiv, 03056, Ukraine

*Corresponding author: dokshyna.sofiia@lkl.kpi.ua

Abstract. *This study analyses the volumes of plastic, polyethylene, and waste tires generated in Ukraine and assesses the potential for obtaining alternative fuels from these wastes. This waste is accumulating rapidly around the world, and Ukraine is no exception. Therefore, the purpose of this study is to determine the potential for obtaining domestic alternative fuels from waste plastic, polyethylene, and waste tires. The subject of study is the encompasses waste plastic, polyethylene, and waste tires. The subject of the study is waste plastic, polyethylene, and worn-out tires, and their energy potential for*

alternative fuel production. The working hypothesis of the study is that the establishment of an environmentally friendly collection and processing of these wastes can partially resolve the energy situation in the country. A systematic review of existing studies was chosen as the research method, as official data from the State Statistics Service of Ukraine does not fully reflect the current state of waste generation. The study revealed the following. The volume of plastic waste generated in Ukraine annually ranges from 990 thousand tonnes/year to 1820 thousand tonnes/year, with an average of 1405 thousand tonnes/year. Accordingly, the amount of fuel that can be obtained from plastic waste ranges from 297 thousand tonnes/year to 1729 thousand tonnes/year. Every year, 3–4.1 million tonnes of polyethylene waste remains unrecycled. The potential for producing fuel from polyethylene waste ranges from 1500 thousand tonnes per year to 3700 thousand tonnes per year. Ukraine generates 225–360 thousand tonnes of unused worn-out tires annually. The potential for obtaining fuel from waste tires ranges from 67.5 thousand tonnes per year to 180 thousand tonnes per year. Thus, the total potential for obtaining motor fuel from waste plastic, polyethylene, and waste tires ranges from 1864.5 thousand tonnes/year to 5609 thousand tonnes/year and indicates the need to establish environmental management of these wastes in Ukraine. The proposed hypothesis has been substantiated by the results of these studies.

Keywords: composite motor fuels, plastic recycling, polyethylene recycling, waste tire recycling, environmental protection, energy efficiency, decarbonization.

Надійшла до редколегії: 11.07.2024