

ЕКОЛОГІЧНІ ПРОБЛЕМИ В ЕНЕРГЕТИЦІ

ENVIRONMENTAL PROBLEMS IN ENERGY

УДК 628.4:662.756

DOI 10.20535/1813-5420.3.2025.339799

С.В. Бойченко¹, д-р техн. наук, проф., ORCID 0000-0002-2489-4980

С.Ю. Жолтайли¹, PhD, ORCID 0000-0001-8136-8779

І.О. Шкільнюк¹, канд. техн. наук, ORCID 0000-0002-8808-3570

А.В. Яковлєва¹, канд. техн. наук, доцент, ORCID 0000-0002-7618-7129

Д. Д. Мугенов¹, PhD, ORCID 0000-0001-7780-3416

С.Г. Шман¹, аспірант, ORCID 0009-0006-9750-824X

А.О. Запорожець¹, д-р техн. наук, ORCID 0000-0002-0704-4116

¹Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

ЕКОЛОГІСТИЧНА МОДЕЛЬ ЗБОРУ ТА УТИЛІЗАЦІЇ ЕНЕРГОЄМНИХ ВІДХОДІВ ДЛЯ ОДЕРЖАННЯ ДОДАТКОВИХ ПАЛИВНО-ЕНЕРГЕТИЧНИХ РЕСУРСІВ

Метою дослідження є розроблення та обґрунтування моделі екологічно орієнтованої логістики для ефективного збору, сортування, очищення та транспортування енергоємних відходів з подальшим їх використанням як сировини для виробництва альтернативного моторного палива.

Методика реалізації: У роботі використано системний підхід до аналізу життєвого циклу композиційного моторного палива. Розроблено структурну схему початкового етапу логістики – збору та транспортування відходів. Для оцінки потенціалу використання вторинної сировини проаналізовано характеристики пластику (окремо поліетилену), зношених шин, харчових та відходів тваринництва як джерел компонентів альтернативного пального. **Результати дослідження:** Запропоновано поетапну модель логістичного процесу, яка включає три ключові кроки: збір, сортування з очищенням та транспортування енергоємних відходів. Представлена структурна схема візуалізує взаємозв'язок між цими етапами. Доведено доцільність використання вторинної сировини для виробництва піролізного палива та біопалива, що дає змогу знизити залежність від традиційних викопних ресурсів.

Висновки: Запропонована модель екологічно орієнтованої логістики дозволяє ефективно інтегрувати енергоємні відходи у процес виробництва альтернативного палива. Її реалізація сприяє зниженню негативного впливу на довкілля, підвищенню надійності енергозабезпечення та формуванню основ для впровадження принципів циркулярної економіки в енергетичній галузі.

Дослідження виконуються у рамках проєкту «Розроблення технологічних рішень отримання композиційних моторних палив із вторинної сировини для підвищення енергетичної безпеки» за рахунок державного бюджету згідно наказу Міністерства освіти і науки України №1572 від 27.12.2023 р. «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).

Ключові слова: екологістика небезпечних відходів, паливна незалежність, утилізація пластику, утилізація зношених шин, утилізація відпрацьованої олії, утилізація тваринних жирів, енергетична безпека, композиційні моторні палива.

Вступ 3 метою скорочення кількості відходів в країні, особливо за небезпечними відходами та підвищення рівня власного виробництва палива всередині країни, доцільним є використання вторинної сировини для виробництва компонентів альтернативного моторного палива. Цей підхід до використання вторинної сировини має великий потенціал, оскільки він дозволяє ефективно переробляти відходи з високою енергоємністю. До таких відходів можна віднести відходи пластикових матеріалів, зношені шини та відходи харчової промисловості. Кожен з цих типів відходів має окремі обсяги і потенціал для переробки з отриманням цінної енергетичної продукції.

Згідно із [1], щорічний обсяг відходів пластикових матеріалів в Україні становить 1444 тис. тонн/рік, з яких 520 тис. тонн/рік – поліетилен (ПЕ). Частину цього обсягу – 838 тис. тонн/рік (у т.ч. 302 тис. тонн

ПЕ) можливо переробити в умовах, що задовольняють екологічним та енергетичним вимогам. Пластик, особливо поліетилен, має високий енергетичний потенціал і може бути перетворений у рідке паливо за допомогою процесів піролізу, та бути удосконалений за допомогою каталітичного крекінгу чи газифікації. Отримані продукти мають характеристики, схожі на легкі фракції пального, і після доочищення можуть застосовуватись у транспортній сфері.

Зношені шини представлені обсягом 255 тис. тонн на рік, з яких 102 тис. тонн/рік – потенціал отримання альтернативного палива шляхом піролізу так само як і пластик [1]. Вони містять вуглеводневі полімери, каучук, вуглець і мінеральні добавки. Зношені шини можуть бути утилізовані піролізом для отримання моторного палива.

Відходи харчової промисловості включають в себе відпрацьовані рослинні олії та тваринні жири. Обсяг відпрацьованих (використаних) рослинних олій становить 1460 тис. тонн на рік, з яких близько 1212 тис. тонн/рік. – потенціал альтернативного палива шляхом піролізу [2]. Тваринні жири представлені в загальному обсязі 80 тис. тонн/рік, з яких 60 тис. тонн/рік мають потенціал енергетичного використання [2]. Паливо, отримане з таких джерел, характеризується високою енергетичною цінністю, стабільністю при зберіганні та екологічною безпечністю при спалюванні, що робить ці відходи стратегічно важливими для переходу до стійкої енергетики в транспортному секторі.

Підсумковий потенціал енергетичної утилізації становить 1001 тис. тонн/рік. Це та кількість вторинної сировини, яка реально може бути використана для одержання альтернативного моторного палива.

Мета дослідження полягає у побудові екологістичної моделі ефективного збору, логістики та переробки енергоємних відходів для отримання додаткових паливно-енергетичних ресурсів альтернативного походження, з урахуванням життєвого циклу палива та комплексної оцінки ризиків.

Об'єктом дослідження виступають процеси збору, логістики та переробки таких енергоємних відходів, як пластик (окремо поліетилен), зношені шини, відходи харчової промисловості та тваринництва.

Предметом дослідження є екологістична модель, яка поєднує логістичні та технологічні рішення для перетворення енергоємних відходів в альтернативне моторне паливо з урахуванням ризиків на кожному етапі життєвого циклу.

Робоча гіпотеза зводиться до впровадження модернізованої екологістичної моделі збору та переробки енергоємних відходів, що дозволить підвищити обсяги виробництва альтернативного моторного палива з високим енергетичним потенціалом, та зменшити залежність від традиційних енергоресурсів і сприятиме енергетичній безпеці України.

Матеріали та результати дослідження

В якості сировини, яка може бути застосована для отримання альтернативного моторного палива, пропонується використовувати відходи пластикових матеріалів, зношені шини та відходи харчової промисловості. Для наочної демонстрації щорічного потенціалу застосування такої вторинної сировини, сформовано схему, яка відображена на рисунку 1.

В роботі [3] зазначені етапи життєвого циклу композиційного моторного палива: як традиційного, так і екологічно чистого. Інтеграція вторинної сировини в життєвий цикл композиційного моторного палива передбачає заміну традиційного видобутку нафти процесом збору та заготівлі енергоємних відходів. Замість буріння свердловин організовується ефективна система логістики: збір відпрацьованих олій, тваринних жирів, пластикових матеріалів і зношених шин із різних секторів економіки. Важливо не лише зібрати сировину, а й забезпечити її сортування, очищення від домішок і доставку до спеціалізованих підприємств. Тому, для отримання додаткових паливно-енергетичних ресурсів альтернативного походження, в життєвий цикл композиційного моторного палива пропонується впровадити такі кроки, як: збір, сортування, очищення і транспортування сировини. В комплексі ці заходи формують екологістичну модель збору та утилізації енергоємних відходів для одержання додаткових паливно-енергетичних ресурсів.

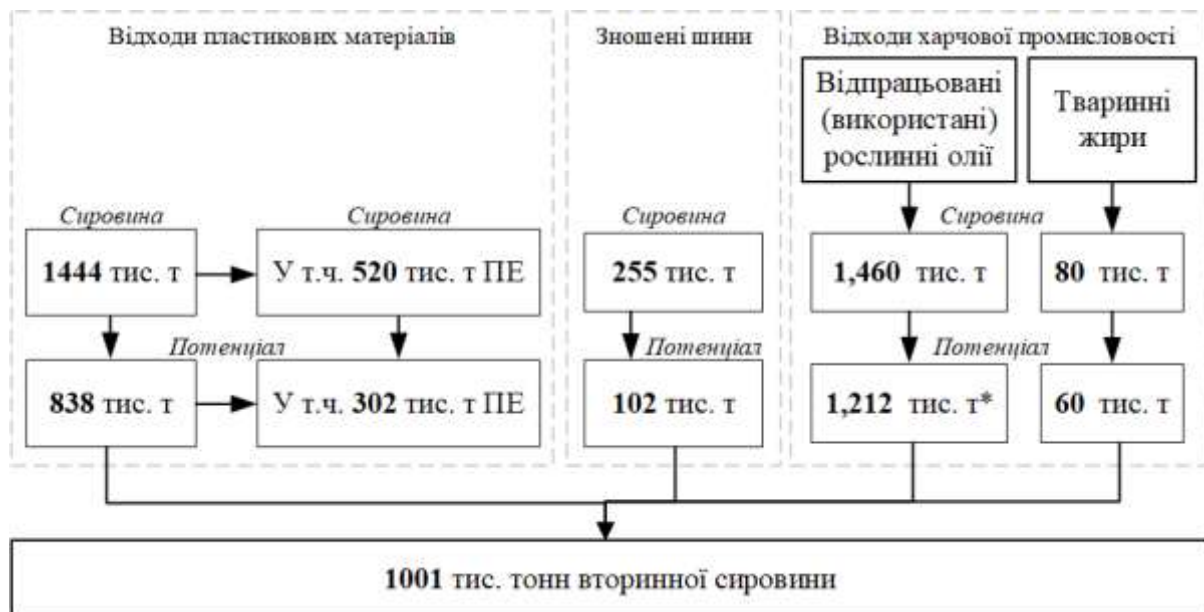
Екологістична модель збору та утилізації енергоємних відходів для одержання додаткових паливно-енергетичних ресурсів із врахуванням запропонованих кроків представлена на рисунку 2.

Розглянемо кожен крок більш детально.

Крок 1: Збір відходів

Збір пластикових відходів починається з організації окремого накопичення цього типу сировини. Пластик зазвичай збирається у великі мішки, сітчасті контейнери або пластикові баки об'ємом 240-1100 літрів [4]. Такі контейнери встановлюють у місцях масового скупчення відходів: біля житлових будинків, на підприємствах, у торгових центрах та освітніх установах. Найбільший обсяг пластикових відходів надходить із комунального сектору, закладів громадського харчування, магазинів і підприємств, що використовують пластикову упаковку. Для забезпечення регулярного збору можна укласти угоди з компаніями, що мають ліцензії на обробку та вивезення відходів, або ж організовувати закупівлю вторинного пластику у сортувальних станцій, які вже проводять попереднє розділення сміття. Часто збором пластикових відходів займаються приватні підприємства, а організація такого процесу може

здійснюватись через оголошення тендерів або публічні закупівлі послуг із сортування, транспортування та обробки вторинної сировини.



*Якщо взяти до уваги обсяги вироблення соняшникової олії 6,1 млн тонн та припустити, що лише 10 частина використовується як фритюрна олія та стає непридатною для подальшого використання, тобто 610 тис. тон, то очікуваний річний потенціал отримання альтернативного палива (або його компонентів) складе 506,3 тис. тонн/рік [2]

Рисунок 1 – Потенціал отримання компонентів альтернативного моторного палива з пластику (окремо поліетилену), зношених шин, відходів харчової промисловості та тваринництва

Зношені шини збираються переважно у спеціальні металеві контейнери або ж укладаються у штабелі на промислових майданчиках. Основними джерелами цих відходів є СТО, шиномонтажі, автопарки комунальних служб, транспортні підприємства та звичайні громадяни. Законодавство вимагає, щоб юридичні особи самостійно забезпечували утилізацію шин, тож частину обсягів можна викупити або отримати на умовах безкоштовного вивезення у підприємств, які не мають власних конвеєрів на утилізацію. Для цього створюються спеціальні мобільні пункти збору або укладаються довгострокові договори з місцевими операторами відходів. Органи місцевого самоврядування можуть оголошувати тендери на збирання та переробку шин, залучаючи ліцензовані компанії до цього процесу [5].

Відпрацьовані рослинні олії та тваринні жири збираються у герметичні пластикові або металеві бочки об'ємом від 20 до 200 літрів [6]. Такі відходи утворюються переважно в закладах громадського харчування, харчових підприємствах, ресторанах, їдальнях, м'ясокомбінатах і молокозаводах. Власники таких закладів зазвичай зацікавлені у належній утилізації відпрацьованої олії, оскільки це передбачено санітарними та екологічними нормами. Часто ці жири й олії утилізуються безкоштовно, або навіть із додатковою платою підприємствам за передачу. Для організації збору укладаються договори з постачальниками сировини, а також проводяться переговори з великими мережами закладів харчування, які регулярно утворюють значні обсяги цієї вторинної сировини. У промислових масштабах такий збір організовується через укладення договорів або участь у тендерах на збір і транспортування харчових відходів, що містять жири та олії.

Отже, організація збору енергоємних відходів потребує системного підходу, який включає не лише інфраструктуру, що включає контейнери, баки, транспорт тощо, а й налагодження юридичних і господарських відносин з постачальниками відходів. Використання механізмів тендерів, довгострокових угод, партнерств із бізнесом і комунальними службами дозволяє забезпечити стабільні обсяги сировини для подальшої енергетичної утилізації.

Крок 2: Сортування і очищення

Сортування *пластикових відходів* зазвичай виконується на спеціалізованих сортувальних лініях, які входять до складу підприємств із переробки твердих побутових відходів або окремих центрів з обробки вторинної сировини. Сортування здійснюється за видом пластику (ПЕТ, ПЕ, ПП, ПВХ та інші), кольором, ступенем забруднення та можливістю подальшої переробки. Для цього використовуються ручні конвеєрні лінії, де оператори в захисному одязі вручну відбирають придатний до переробки пластик, а також автоматичні сепаратори – оптичні, інфрачервоні або повітряні [7]. Важливою частиною процесу є

подрібнення у шредерах або дробарках, після чого подрібнений пластик миється та сушиться. Деякі підприємства поєднують сортування й очищення в єдиний цикл – після сортування фракції автоматично подаються в мийні модулі, що дозволяє значно знизити витрати на логістику та зберігання. В Україні вже працюють приватні компанії, такі як "Укреко-Індастрі" [8], "Київміськвторресурси" [9], а також сортувальні станції при полігонах. Домовитись про співпрацю можна через комерційну пропозицію або довгостроковий договір, а у випадку з муніципальними установами – через участь у відкритих конкурсах або публічних закупівлях.

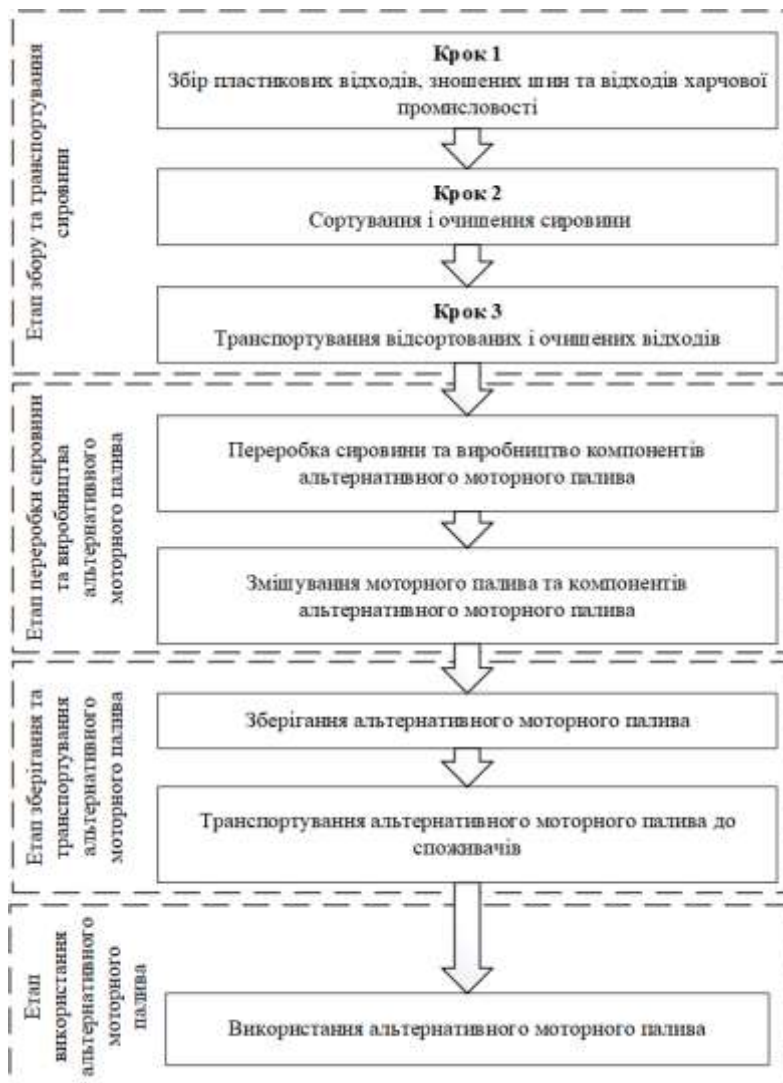


Рисунок 2 – Екологістична модель збору та утилізації енергоємних відходів із врахуванням збору, сортування, очищення і транспортування вторинної сировини

Сортування зношених шин зазвичай простіше за пластик, оскільки їх класифікація базується переважно на розмірах, ступені зносу та наявності домішок. Шини не сортують вручну на конвеєрі, а приймають як цілі об'єкти. Після первинного візуального контролю вони подаються в подрібнювачі – гідравлічні преси або роторні шредери, де розрізаються на фрагменти. В окремих випадках із шин попередньо видаляються сталеві корди за допомогою магнітних сепараторів. Після подрібнення, сировина може бути відразу спрямована на піроліз або зберігатися у спеціальних контейнерах. Підприємства, які займаються утилізацією шин, як правило, поєднують процеси сортування, подрібнення та часткового очищення у єдиній виробничій лінії. В Україні такі підприємства діють у Київській [10], Дніпропетровській областях [11] та місті Києві. Організувати співпрацю із такими підприємствами можна напряму, укладаючи договори про прийом або закупівлю сировини, або через спільні проекти з муніципалітетами.

Сортування відходів харчової промисловості, таких як відпрацьовані олії та тваринні жири, починається вже на етапі збору. Основне завдання – відокремити олії від інших кухонних відходів та механічних домішок [12]. Виробничі підприємства та заклади харчування зазвичай накопичують ці

відходи в окремі бочки, тому первинне сортування часто не потрібне. Проте після надходження на підприємство, сировина проходить контроль якості: перевіряють наявність домішок, вологі, кислотності та ступеня окиснення. Сировина, що відповідає технічним умовам, подається в установки для очищення. Тут сортування за типом (рослинні або тваринні) поєднується з фільтрацією, осадженням, центрифугуванням і, за потреби, нейтралізацією кислоти. Ці процеси часто об'єднані в замкнуту технологічну лінію. Підприємства, що спеціалізуються на переробці жирових відходів, виробляють біопаливо або компоненти для нього. Співпраця можлива через комерційні домовленості, постачання сировини на договірній основі або спільне створення інфраструктури збору й очищення.

Таким чином, в більшості випадків вже існують технічні рішення, обладнання і фахівці, які дозволяють інтегрувати цей етап у загальний процес переробки. Поєднання сортування й очищення в рамках єдиної лінії значно підвищує ефективність підготовки сировини до енергетичної утилізації. Співпраця з підприємствами у цій сфері є реальною за наявності чіткої моделі взаємодії, прозорих умов і узгодженого економічного інтересу.

Крок 3 Транспортування відсортованих і очищених відходів

Транспортування сировини після етапу збору й сортування є важливою складовою логістичного ланцюга, який забезпечує безперервність виробництва альтернативного моторного палива. Кожен тип відходів має свої особливості, що впливають на вибір транспортних засобів, типів тари та вимог до безпеки.

Пластикові відходи, особливо у вигляді подрібнених фрагментів, транспортуються у великих мішках або в полімерних контейнерах. Якщо матеріал подрібнений на дрібні гранули, їх перевозять у герметичних мішках або цистернах із сухим завантаженням, щоб уникнути розсипання. У разі транспортування непомитого або брудного пластику з високим вмістом органіки, можливе виділення неприємного запаху, що потребує швидкої доставки або ізоляції в герметичну тару. З екологічної точки зору, пластик не вважається отруйним, але при його нагріванні чи руйнуванні можуть виділятися шкідливі леткі речовини, такі як бензол, толуол, стирен, альдегіди, кетони і інші [13]. Тому працівники, які контактують із вантажем, мають використовувати рукавички, респіратори та захисний одяг, особливо під час навантаження вручну. Транспортування відбувається переважно автотранспортом – вантажівками з відкритим або закритим кузовом, залежно від погоди й виду тари.

Зношені шини зазвичай транспортуються подрібненими. Подрібнені шини переважно перевозять у мішках, контейнерах або в бункерах, якщо транспорт має завантажувальне обладнання. Через те, що гума може мати залишки мастил, пилу, важких металів або інших домішок, вважається, що вона має помірний рівень екологічної небезпеки [14]. Особливо це стосується транспортування влітку, коли підвищується ризик самонагрівання. Завантаження і розвантаження шин потребує механізації – автонавантажувачів, стрічкових конвеєрів або кранів. Часто використовуються вантажівки типу "мультиліфт" або великогабаритні контейнери, які можуть перевантажуватися на спеціалізованих майданчиках переробного заводу.

Відпрацьовані рослинні олії та тваринні жири транспортуються у герметичних металевих або полімерних бочках, а у промислових обсягах – у спеціальних ізотермічних цистернах. Ці рідини мають підвищену пожежонебезпеку, а також швидко окислюються і псуються при контакті з повітрям та високими температурами. Через це транспортування повинно бути швидким, контрольованим за температурою, а також виключати протікання. У разі порушення герметичності є ризик забруднення ґрунту, води і створення місць гниття, що призводить до утворення шкідливих випарів. Найчастіше транспортування організовується автоцистернами з термоізоляцією або бочками, встановленими на палетах, що дозволяє переміщати сировину навантажувачем.

Усі типи відходів повинні супроводжуватись відповідною документацією – товарно-транспортними накладними, сертифікатами походження та, за потреби, екологічними дозволами [15]. Транспортні засоби мають бути очищені після кожного перевезення, особливо у випадках, коли змінюється тип вантажу. У разі міжобласного перевезення або експорту можуть знадобитися додаткові дозволи відповідно до екологічного законодавства.

Особливу увагу варто приділяти координації логістики. Заводи, що виробляють екологічно чисте паливо, зазвичай працюють за чіткими графіками постачання, щоб забезпечити стабільне завантаження ліній. Будь-які затримки або порушення графіку можуть призвести до збоїв у переробці, псування сировини або перевищення складських можливостей. Тому логістичні процеси варто організовувати у встановлені строки або через створення буферних складів-сателітів, розташованих неподалік від заводу.

Етап транспортування відходів до переробного заводу потребує урахування фізико-хімічних властивостей сировини, її ризиків для довкілля та здоров'я людей, а також ефективної організації маршрутів, тари і взаємодії з перевізниками.

На рисунку 3 зображено структурну схему ефективного збору, логістики та переробки енергоємних відходів.

Екологістична модель містить також такі етапи, як переробка, зберігання та використання моторного палива (рис. 2). На етапі переробки відходи трансформуються в енергетично цінні компоненти. З пластиків та шин отримують піролізне паливо, яке після гідроочищення наближається за характеристиками до традиційного пального. Рослинні олії та тваринні жири проходять хімічну обробку і перетворюються на біопаливо. Ці процеси мають бути енергоефективними, із мінімальними викидами і можливістю повторного використання тепла та побічних продуктів.

Після переробки паливо зберігають у спеціально обладнаних резервуарах, які забезпечують необхідні умови для збереження його якості. Композиційне моторне паливо особливо чутливе до впливу навколишнього середовища, тому для нього важливо уникати окислення, розшарування та змін фізико-хімічних властивостей. Для цього підтримують стабільну температуру, забезпечують герметичність резервуарів, а також використовують спеціальні стабілізатори, які допомагають зберегти склад палива незмінним протягом тривалого часу. Такий контроль дозволяє зберігати паливо без втрати його ефективності і безпечно використовувати у подальшому. Далі паливо доставляють до заправних станцій або безпосередньо до кінцевих споживачів. Частина існуючої інфраструктури може бути використана для цього процесу, проте в окремих випадках доведеться будувати нові системи або модернізувати вже наявні, щоб вони відповідали вимогам нового виду палива. На цьому етапі особливо важливо забезпечити безпеку транспортування, уникнути витоків і зберегти якість палива, щоб воно не втрачало своїх властивостей під час перевезення та зберігання.

Завершальним етапом життєвого циклу є використання палива. Композиційне моторне паливо може застосовуватися як добавка до традиційного пального або як самостійний вид палива, залежно від типу двигуна та відповідної сертифікації. Використання такого палива допомагає зменшити викиди вуглекислого газу та інших шкідливих речовин, що позитивно впливає на стан атмосфери і знижує екологічне навантаження. Таким чином, повне включення вторинної сировини у виробництво палива сприяє заміні викопних джерел енергії на більш сталу і дружню до довкілля альтернативу.



Рисунок 3 – Структурна схема етапу збору та транспортування сировини

Висновки

Розроблено екологістичну модель, яка враховує етапи збору, сортування та очищення сировини для виробництва альтернативного моторного палива. Розглянуто можливості одержання компонентів альтернативного моторного палива з енергоємних відходів, зокрема пластику (окремо поліетилену), зношених шин, а також залишків харчової промисловості та тваринництва. Запропонована екологістична модель збору та утилізації враховує усі основні етапи поводження з вторинною сировиною – від збору й сортування до очищення та транспортування. У межах моделі деталізовано три ключові кроки початкового етапу: збір відходів, сортування й очищення, що дозволяє оптимізувати логістику та підвищити ефективність переробки. Представлена структурна схема наочно відображає послідовність і взаємозв'язок процесів на цьому етапі. Отримані результати сприяють подальшому розвитку моделі життєвого циклу композиційного моторного палива та демонструють її потенціал у заміщенні традиційних викопних ресурсів сталими енергетичними альтернативами. Дана модель дозволяє виробити стратегію розвитку налагодження екологістики збору та утилізації небезпечних відходів, зокрема, пластикових відходів, відходів зношених шин, відходів відпрацьованої рослинної олії та тваринних жирів в Україні, що особливо важливо для зменшення відходоємності країни та збільшення обсягу виробництва власного палива, наслідком чого є енергетична безпека країни.

Список використаних джерел

1. Бойченко С., Жолтайли С., Шкільнюк І., Куберський І., Левандовський І. Аналіз потенціалу отримання композиційного моторного палива з відходів пластику та поліетилену та відходів зношених шин в Україні // Системні дослідження в енергетиці. 2024. № 4 (80). С. 41–55. DOI: <https://doi.org/10.15407/srenergy2024.04.041>.
2. Бойченко С.В., Докшина С.Ю., Шкільнюк І.О., Яковлева А.В., Зубенко С.О. Обґрунтування потенціалу отримання композиційного моторного палива з відходів виробництва рослинних олій та тваринництва // Енергетика: економіка, технології, екологія. 2024. № 3. С. 147–156. DOI: <https://doi.org/10.20535/1813-5420.3.2024.314631>.
3. Yakovlieva A., Kurdel P., Ceskovic M., Gecejova N. Risks determination during the life-cycle of conventional and sustainable aviation fuels – the environmental aspect. 2022 IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering and 2022 IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe (EEEIC / I&CPS Europe). 2022. P. 1–6. DOI: 10.1109/NTAD57912.2022.10013613.
4. ДСТУ EN 840-2:2022. Контейнери на коліщатах для збору твердих відходів. Частина 2. Технічні вимоги і методи випробування для контейнерів об'ємом до 1300 л з двома колесами. Київ: ДП «УкрНДНЦ», 2022.
5. Закон України «Про управління відходами» від 20.06.2022 № 2320-IX. *Відомості Верховної Ради України*. 2022. № 41. Ст. 344.
6. Олія для біопалива. *EcoEst*: веб-сайт. URL: <https://ecoest.com.ua/oliya.php> (дата звернення: 28.06.2025).
7. Längle T., Maier G. Sensor-Based Sorting for Waste Plastics Recycling // Buettner A., Weidner E. (eds.) Springer Handbook of Circular Plastics Economy. Cham: Springer, 2025. P. 243–260. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-031-66209-6_18.
8. Укреко // Офіційний сайт: веб-сайт. URL: <https://ukreko.com.ua/uk/> (дата звернення: 28.06.2025).
9. Інститут соціальної та політичної психології НАПН України. Проекти: веб-сайт. URL: <https://ispn.kyivcity.gov.ua/FullInfo/1216> (дата звернення: 28.06.2025).
10. MOBIUS – центр утилізації шин: веб-сайт. URL: <http://www.mobius.ua> (дата звернення: 28.06.2025).
11. Nika Oil – біопаливо з олій: веб-сайт. URL: <https://www.nika-oil.com> (дата звернення: 28.06.2025).
12. Kosma I., Kalogianni A. Residual lipids pretreatment towards renewable fuels. *Book of Abstracts – 29th European Biomass Conference and Exhibition*. 2021. P. 512–516. URL: https://www.researchgate.net/publication/390824228_Residual_Lipids_Pretreatment_Towards_Renewable_Fuels (дата звернення: 28.06.2025).
13. Beel G., Langford B., Carslaw N., Shaw D., Cowan N. Temperature driven variations in VOC emissions from plastic products and their fate indoors: A chamber experiment and modelling study. *Science of The Total Environment*. 2023. Vol. 882. Article 163497. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.163497>.
14. Gomes F.O., Rocha M.R., Alves A., Ratola N. A review of potentially harmful chemicals in crumb rubber used in synthetic football pitches. *Journal of Hazardous Materials*. 2021. Vol. 414. Article 124998. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.124998>.
15. Гринько І.В., Левченко В.П. Управління відходами: теорія, практика, екологічна безпека. Київ: Видавничий дім «Кондор», 2018. 332 с.

S. Boichenko ¹, Dr. Sc. (Eng.), Prof., ORCID 0000-0002-2489-4980

S. Zholtaily ¹, PhD, ORCID 0000-0001-8136-8779

I. Shkilniuk ¹, Cand. Sc. (Eng.), ORCID 0000-0002-8808-3570

A. Yakovlieva ¹, Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Prof, ORCID 0000-0002-7618-7129

D. Muhenov ¹, PhD, ORCID 0000-0001-7780-3416

S. Shman ¹, Ph. D. student, ORCID 0009-0006-9750-824X

A. Zaporozhets ¹, Dr. Sc. (Eng.), ORCID 0000-0002-0704-4116

¹National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”

ECOLOGICAL MODEL OF COLLECTION AND DISPOSAL OF ENERGY-INTENSIVE WASTE TO OBTAIN ADDITIONAL FUEL AND ENERGY RESOURCES.

Objective of the study is to develop and substantiate a model of environmentally oriented logistics for the efficient collection, sorting, cleaning, and transportation of energy-intensive waste with their subsequent use as raw materials for the production of alternative motor fuels. **Methodology:** The study employs a systems approach to analyze the life cycle of composite motor fuel. A structural scheme for the initial stage of logistics - waste collection and transportation has been developed. To assess the potential use of secondary raw materials, the characteristics of plastics (and separately polyethylene), worn tires, food, and livestock waste as sources of alternative fuel components were analyzed. **Research results:** A phased model of the logistics process is proposed, including three key steps: collection, sorting with cleaning, and transportation of energy-intensive waste. The presented structural scheme visualizes the interrelationship between these stages. The feasibility of using secondary raw materials for the production of pyrolysis oil and biofuel has been demonstrated, enabling a reduction in dependence on traditional fossil resources. **Conclusions:** The proposed model of environmentally oriented logistics enables effective integration of energy-intensive waste into the alternative fuel production process. Its implementation contributes to reducing negative environmental impacts, enhancing energy supply reliability, and laying the foundation for the introduction of circular economy principles in the energy sector.

The research is carried out within the framework of the project “Development of technological solutions for obtaining composite motor fuels from secondary raw materials to enhance energy security” funded by the state budget in accordance with the order of the Ministry of Education and Science of Ukraine No. 1572 dated 27.12.2023 “On approval of the list of fundamental scientific research projects, applied scientific research, scientific and technical (experimental) developments, whose performers are higher education institutions and scientific institutions under the Ministry of Education and Science of Ukraine, which passed competitive selection and whose funding will start in 2024 from the State Budget of Ukraine” (registration number 0124U000973).

Keywords: environmental logistics of hazardous waste, fuel independence, plastic recycling, used tire recycling, waste oil recycling, animal fat recycling, energy security, composite motor fuels.

References

1. S. Boichenko, S. Zholtaily, I. Shkilniuk, I. Kuberskyi, and I. Levandovskyi. (2024). Analysis of the potential for obtaining composite motor fuel from plastic, polyethylene and used tire waste in Ukraine. *System Research in Energy*, no. 4(80), pp. 41–55. [in Ukrainian]. DOI: <https://doi.org/10.15407/srenergy2024.04.041>.
2. S. V. Boichenko, S. Yu. Dokshyna, I. O. Shkilniuk, A. V. Yakovlieva, and S. O. Zubenko. (2024). Substantiation of the potential for obtaining composite motor fuel from vegetable oil and livestock waste. *POWER ENGINEERING: economics, technique, ecology*. no. 3, pp. 147–156. DOI: <https://doi.org/10.20535/1813-5420.3.2024.314631>.
3. A. Yakovlieva, P. Kurdel, M. Ceskovic, and N. Gecejova. Risks determination during the life-cycle of conventional and sustainable aviation fuels – the environmental aspect. *Proc. 2022 IEEE Int. Conf. on Environment and Electrical Engineering and 2022 IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe (EEEIC / I&CPS Europe)*. 2022. pp. 1–6. DOI: 10.1109/NTAD57912.2022.10013613.
4. DSTU EN 840-2:2022. Wheeled containers for the collection of solid waste - Part 2: Technical requirements and test methods for containers up to 1300 l with two wheels. Kyiv: DP “UkrNDNC”. 2022. [in Ukrainian].
5. Law of Ukraine “On Waste Management” dated 20.06.2022 No. 2320-IX. Vidomosti Verkhovnoi Rady Ukrainy, no. 41, art. 344, 2022. [in Ukrainian].
6. Biofuel oil EcoEst. [Online]. Available: <https://ecoest.com.ua/oliya.php>. Accessed on: Jun. 28, 2025
7. Längle, T., Maier, G. (2025). Sensor-Based Sorting for Waste Plastics Recycling. In: Buettner, A., Weidner, E. (eds) *Springer Handbook of Circular Plastics Economy*. Springer Handbooks. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-66209-6_18.

8. "Ukreko," Ofitsiyni sait. [Online]. Available: <https://ukreko.com.ua/uk/>. [in Ukrainian]. Accessed: Jun. 28, 2025
9. "Proiekyty," Instytut sotsialnoi ta politychnoi psykholohii NAPN Ukrainy. [Online]. Available: <https://ispn.kyivcity.gov.ua/FullInfo/1216>. [in Ukrainian]. Accessed on: Jun. 28, 2025
10. "MOBIUS – tsentr utylizatsii shyn." [Online]. Available: <http://www.mobius.ua>. [in Ukrainian]. Accessed on: Jun. 28, 2025
11. "Nika Oil – biopalyvo z olii." [Online]. Available: <https://www.nika-oil.com>. [in Ukrainian]. Accessed on: Jun. 28, 2025
12. I. Kosma and A. Kalogianni. Residual lipids pretreatment towards renewable fuels. in *Book of Abstracts – 29th European Biomass Conference and Exhibition*. 2021. pp. 512–516. [Online]. Available: https://www.researchgate.net/publication/390824228_Residual_Lipids_Pretreatment_Towards_Renewable_Fuel s. Accessed on: Jun. 28, 2025
13. G. Beel, B. Langford, N. Carslaw, D. Shaw, and N. Cowan. Temperature driven variations in VOC emissions from plastic products and their fate indoors: A chamber experiment and modelling study. *Sci. Total Environ.* vol. 882, art. no. 163497, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.163497>.
14. F. O. Gomes, M. R. Rocha, A. Alves, and N. Ratola, "A review of potentially harmful chemicals in crumb rubber used in synthetic football pitches. *J. Hazard. Mater.* vol. 414. art. no. 124998, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.124998>.
15. I. V. Hryenko and V. P. Levchenko. Waste management: theory, practice, environmental safety. Kyiv: Kondor. 2018. 332 p. [in Ukrainian].

Надійшла: 04.07.2025
Received: 04.07.2025