

Людмила GERUN
аспірант Західноукраїнського
національного університету

ЗНИЖЕННЯ ВУГЛЕЦЕВОГО СЛІДУ В ЛОГІСТИЧНИХ ЛАНЦЮГАХ ПЛАСТИКОВИХ ВІДХОДІВ

Сучасний етап розвитку світової економіки характеризується стрімким зростанням обсягів виробництва та споживання пластмас, що збільшує накопичення значних обсягів пластикових відходів та формує суттєве екологічне навантаження на довкілля. Одним із ключових наслідків цього процесу є зростання викидів парникових газів, що сприяє глобальним кліматичним змінам.

Особливої уваги потребують логістичні ланцюги пов'язані з пластиковими відходами, які охоплюють етапи збору, транспортування, сортування, переробки та утилізації. Неефективність цих процесів, застаріла інфраструктура, нерациональна маршрутизація та висока залежність від викопного палива призводять до значного підвищення вуглецевого сліду. В умовах глобального переходу до принципів сталого розвитку та циркулярної економіки оптимізація логістичних систем управління пластиковими відходами набуває стратегічного значення.

Методом дослідження є комплексний аналіз формування вуглецевого сліду в логістичних ланцюгах пластикових відходів та обґрунтування ефективних напрямків його зниження шляхом оптимізації логістичних процесів, впровадження принципів циркулярної економіки та застосування сучасних технологічних рішень.

Пластикові матеріали є одними з найбільш широко використовуваних у сучасній економіці, проте їхній життєвий цикл супроводжується значними викидами парникових газів. Основним джерелом таких викидів є використання викопної сировини, що формує високий рівень вуглецевого сліду на всіх етапах – від виробництва до утилізації [1, ст. 225–228].

За міжнародними оцінками, щорічне виробництво пластмаси генерує понад 1 млрд тонн CO₂, а до 2050 року цей показник може зрости до 1,8 млрд тонн [2, ст. 18–22]. Водночас значна частка вихідних формується саме у сфері поводження з відходами, зокрема в логістичних процесах [5, ст. 116–120].

Логістичні ланцюги включають наступні етапи: збір відходів, первинне сортування, транспортування до переробних підприємств і подальшу утилізацію або переробку. Найбільш енергоємним етапом є транспортування, яке формує від 30% до 50% загального обсягу викидів у системі управління відходами [3, ст. 3–7]. Це зумовлено використанням транспорту з двигунами внутрішнього згоряння, низьким коефіцієнтом завантаження та неефективною організацією маршрутів. Важливою проблемою є також недостатній рівень сортування

відходів, що знижує якість вторинної сировини та збільшує кількість відходів, які підлягають спалюванню або захороненню, що супроводжується додатковими викидами CO₂ [1, ст. 229–232].

Значний потенціал скорочення вуглецевого сліду пов'язаний із впровадженням принципів циркулярної економіки, яка забезпечує максимальне повторне використання ресурсів та мінімізацію утворення відходів. Використання вторинної сировини дозволяє зменшити викиди на 30–80% залежно від виду полімеру [1, ст. 233–236].

Таблиця 1

Рівень скорочення викидів CO₂ при використанні вторинної сировини

Вид пластику	Швидкість викидів CO₂
Поліетилентерефталат (ПЕТ)	60%
Поліетилен високої щільності (HDPE)	50–70%
Поліпропілен (ПП)	30–50%

Джерело: [8]

Використання вторинної пластикової сировини суттєво знижує вуглецевий слід виробництва за рахунок меншої потреби в первинних нафтохімічних ресурсах та енергії. Найбільший ефект для поліетилентерефталату (ПЕТ) – до 60%, що пов'язано з високою ефективністю його переробки та розвинутою інфраструктурою рециклінгу. Для поліетилену високої щільності (HDPE) скорочення становить 50–70% залежно від технологій переробки та логістики. Поліпропілен (ПП) демонструє нижчі показники (30–50%), що пояснюється складнішою переробкою та меншою часткою замкнутих циклів використання. Загалом, перехід на вторинну сировину є одним із ключових інструментів декарбонізації пластикової галузі.

Міжнародний досвід свідчить про ефективність оптимізації логістичних систем. У Європейському Союзі інтеграція просторового планування, технологічних інновацій та екологічного регулювання забезпечує суттєве скорочення викидів [5, ст. 110–114]. Таким чином, у Німеччині рівень переробки досягає 45–50%, що дозволяє знизити викиди на 20–30%. У Швеції широко використовують енергетичну утилізацію відходів, тоді як у Японії система локалізації забезпечує скорочення транспортних викидів до 40% [1, ст. 236–238].

Таблиця 2

Порівняння видів транспорту за рівнем викидів CO₂

Тип транспорту	Рівень викидів
Дизельний	Високий
Газовий	Середній
Електричний	Низький
Водневий	Дуже низький

Джерело: [9]

Порівняння різних типів транспорту за рівнем викидів CO₂ демонструє чітку тенденцію до зниження впливу на клімат при переході від викопного палива до альтернативних джерел енергії. Дизельний транспорт характеризується найбільшими викидами через пряме спалювання нафтопродуктів. Газовий транспорт має помірні викиди за рахунок більш чистого згоряння природного газу. Електричний транспорт забезпечує низький рівень викидів, особливо за умов використання відновлюваної електроенергії. Найкращі показники має водний транспорт, який у разі використання «зеленого» водню практично не формує прямих викидів CO₂, що робить його перспективним напрямком декарбонізації транспорту.

Суттєвий ефект забезпечує використання цифрових технологій. Впровадження системи штучного інтелекту, GPS-моніторингу та аналізу великих даних дозволяє оптимізувати маршрути, прогнозувати обсяги відходів і підвищити ефективність логістичних процесів, що погіршує скорочення викидів на 15–20% [4].

Таблиця 3

Структура поводження з пластиковими відходами у світі

Спосіб утилізації	Частка
Переробка	9–10%
Спалювання	19–20%
Полігони	50%
Неконтрольовані відходи	20%

Джерело: [10]

Світова структура поводження з пластиковими відходами демонструє переважання неефективних та екологічно небезпечних методів утилізації. Лише близько 9–10% пластику реально переробляється, що свідчить про обмеженість розвитку циркулярної економіки. Найбільша частка відходів (приблизно 50%) потрапляє на полігони, де відбувається довготривале накопичення та утворення мікропластику. Ще 19–20% спалюється, що супроводжується викидами CO₂ та іншими забруднювачами. Приблизно 20% відходів потрапляє в неконтрольоване середовище, що є критичним джерелом забруднення океанів і ґрунтів. В основному дані підтверджують необхідність розвитку системи переробки та скорочення створення пластикових відходів.

Аналіз сучасних підходів дозволяє виокремити ключові напрями вдосконалення логістичних систем пластикових відходів:

- оптимізація логістичних маршрутів із використанням цифрових технологій [4];
- розвиток децентралізованої інфраструктури сортування та переробки [5, ст. 115–120];
- перехід до екологічно чистого транспорту [3, ст. 5–8];

- впровадження інтелектуальних систем управління відходами [4];
- покращення сортування відходів на рівні джерела їх утворення [1, ст. 229–232];
- застосування концепції «компактного міста» [6, ст. 45–52; 7, ст. 1118–1125];
- підвищення енергоефективності переробних підприємств [5, ст. 118–122];
- економічні та регуляторні стимули [2, ст. 25–30];
- модернізація інфраструктури поводження з відходами [3, ст. 4–7];
- скорочення викидів на етапі «останньої милі» [4];
- моніторинг та оцінка вуглецевого сліду [2, ст. 30–34];
- адаптація європейського досвіду [5, ст. 110–115].

В Україні щорічно утворюється понад 10 млн тонн відходів, з яких переробляється лише 6–8%, тоді як понад 90% захоронюється на полігонах. Частка пластикових відходів становить близько 10–15%.

Основними проблемами є недостатній розвиток інфраструктури, що демонструє ефективну систему роздільного збору та низький рівень логістичної оптимізації [3, ст. 5–7]. Водночас впровадження сучасних підходів, зокрема цифровізації, розвитку сортувальних станцій та механізмів розширеної відповідальності виробника, може зменшити зниження викидів на 15–30% [2, ст. 28–32].



Рис. 1. Оптимізований логістичний ланцюг

Отже, логістичні ланцюги пов'язані з пластиковими відходами є значним джерелом викидів парникових газів. Найбільше екологічне навантаження формується на етапі транспортування, а також унаслідок неефективної організації збору, сортування та подальшої переробки відходів. Це призводить до додаткових викидів CO₂, перевантажує полігони і втрачає значну частину негативної вторинної сировини. Скорочення вуглецевого сліду можливо за рахунок переходу до принципів циркулярної економіки, оптимізації логістичних маршрутів та впровадження цифрових технологій управління потоками відходів. Важливим напрямком є також модернізація інфраструктури переробки та використання екологічно чистих транспортних рішень.

Розвиток сучасної системи управління відходами в Україні є місцем кроком до зменшення екологічного навантаження, підвищення ресурсної ефективності та наближення до європейських стандартів сталого розвитку.

Список використаних джерел:

1. Tonini D., Albizzati P. F., Astrup T. F. Вуглецевий слід пластику від колиски до могили: огляд внеску управління відходами // *Waste Management*. – 2021. – Том 119. – С. 222–238.
2. McKinsey & Company. Декарбонізація ланцюжка створення вартості пластмас. – 2024. – 52 с.
3. Chang Chien J.-H., Kuo T.-C. Скорочення викидів вуглецю в логістиці управління відходами: підхід на основі тематичного дослідження // *Journal of Cleaner Production*. – 2023. – Том 385. – С. 1–12.
4. Reuters. Штучний інтелект та інновації в зеленій логістиці, що трансформують управління відходами. – 2026. – Режим доступу: <https://www.reuters.com>
5. *Science of The Total Environment*. Декарбонізація промисловості пластмас: шляхи та виклики. – 2025. – Том. 912. – С. 110–125.
6. Данциг Г. Б., Саати Т. Л. Компактне місто: план створення придатного для життя міського середовища. – Сан-Франциско: В.Г. Фрімен, 1973. – 230 с.
7. Хофстад Г. Розвиток компактного міста: високі ідеали та нові практики в Європі // *Європейські дослідження планування*. – 2012. – Т. 20(7). – С. 1113–1130.
8. *PlasticsEurope*. Екопрофілі та екологічні декларації продукції європейських виробників пластмас. Брюссель, 2022.
9. Міжнародне енергетичне агентство. Глобальний огляд електромобілів 2024. Париж, МЕА, 2024.
10. Програма ООН з навколишнього середовища. Закриття крана: як світ може покінчити із забрудненням пластиком та створити циркулярну економіку, 2023.