

УДК 658.012.23

DOI: <https://doi.org/10.30837/2522-9818.2024.3.015>

М. Кікоть, Ю. Малєєва

МОДЕЛІ ФОРМУВАННЯ ЛОГІСТИЧНОЇ ІНФРАСТРУКТУРИ РЕСАЙКЛІНГУ СКЛАДНОЇ ТЕХНІКИ

Предмет дослідження – моделі формування логістичної інфраструктури ресайклінгу складної техніки. **Метою роботи** є створення оптимізаційних моделей, які зважатимуть на основні фактори під час формування інфраструктури ресайклінгу й поєднують централізовані та децентралізовані елементи для підвищення ефективності цього процесу. **Завдання:** проаналізувати сучасні підходи до організації ресайклінгу складної техніки; визначити критерії та фактори для оптимізації інфраструктури ресайклінгу; розробити багаторівневу інфраструктуру ресайклінгу; сформувати моделі оптимізації інфраструктури ресайклінгу з огляду на виробничі потужності підприємств і логістичні витрати, екологічний вплив та інші фактори. **Методи:** системний підхід, структурне моделювання, моделі оптимізації. **Результати:** проаналізовано підходи до організації інфраструктури ресайклінгу: централізований, розподілений та комбінований; обґрунтовано вибір комбінованого підходу для створення логістичної інфраструктури ресайклінгу складної техніки; розроблено структурну багаторівневу модель інфраструктури ресайклінгу з нижнім рівнем (сортувальні підприємства), середнім рівнем (підприємства з перероблення) та верхнім рівнем (організаційне управління); сформовано математичні моделі оптимізації інфраструктури ресайклінгу з огляду на виробничі потужності підприємства, логістичні витрати, екологічний вплив на зовнішнє середовище. **Висновки.** Запропонована структурна багаторівнева модель інфраструктури ресайклінгу складної техніки поєднує переваги централізованого та децентралізованого управління, забезпечуючи гнучкість, надійність системи до зовнішнього впливу, мінімізацію витрат і стійкий контроль процесів. Використання розроблених моделей оптимізації дає змогу брати до уваги виробничі потужності підприємства, логістичні витрати, екологічний вплив на зовнішнє середовище та інші фактори для пошуку найбільш ефективної конфігурації інфраструктури ресайклінгу. Реалізація запропонованої інфраструктури ресайклінгу забезпечить формування злагодженої взаємодії між державними органами, підприємствами, громадськими організаціями та міжнародними партнерами.

Ключові слова: ресайклінг складної техніки; комбінована інфраструктура; логістика; екологічний вплив; виробничі потужності.

Вступ

Сучасний світ стоїть перед викликами, пов'язаними з екологічною кризою, яка загрожує найціннішим ресурсам планети та загальному добробуту суспільства. Одним із найбільш актуальних сучасних завдань є ефективне управління відходами та розроблення сталих моделей споживання, а також безвідходного виробництва. У цьому контексті ресайклінг виходить на передовий план як ключовий елемент безпечного розвитку індустрії.

Ресайклінг – це багаторазове використання ресурсів завдяки повному переробленню відходів від стану сировини до стану готового продукту. У загальноприйнятому розумінні цей процес належить насамперед до перероблення виробів із паперу, пластику, скла, металу тощо. У широкому ж значенні термін "ресайклінг" – це процес отримання сировини внаслідок повторного перероблення відходів [1].

Ресайклінг у європейських країнах є важливою частиною екологічної політики, спрямованої на

сприяння круговій економіці та зменшення кількості відходів.

Уся система ресайклінгу складної техніки (СТ) охоплює різні типи перероблюваних матеріалів, таких як метал, пластик, акумулятори, скло, електронні плати тощо. Кожен із перелічених матеріалів має свої особливості перероблення, тому їх необхідно спрямовувати до відповідних пунктів, оснащених обладнанням для перероблення конкретних матеріалів. Відповідно, система ресайклінгу передбачає наявність мережі взаємопов'язаних підприємств, що спеціалізуються на різних процесах перероблення та формують певну інфраструктуру.

Іспанська королівська академія (*Real Academia Española, RAE*, 2022) визначає інфраструктуру як "сукупність елементів, засобів або послуг, необхідних для належного функціонування країни, міста чи будь-якої форми організації" [2]. Американський словник спадщини (2022) визначає її як "об'єкти" і як "базову основу, або фундамент, особливо для організації чи системи" [3].

Отже, під інфраструктурою ресайклінгу розуміємо комплексну систему, що містить підприємства з перероблення різних видів відходів, логістичні центри, транспортні шляхи, а також зв'язки та взаємодію між цими компонентами системи. **Об'єктом дослідження** в статті є інфраструктура ресайклінгу складної техніки. **Предмет дослідження** – моделі формування логістичної інфраструктури ресайклінгу складної техніки.

Розвиток транспортної інфраструктури в процесі глобалізації відіграв важливу роль в об'єднанні різних країн у світову економіку. Витрати на транспортування відходів та їх утилізацію стали дуже важливими для всіх країн [4]. Тому побудова інфраструктури ресайклінгу таким чином, щоб оптимізувати дистанцію між пунктами перероблення, їх кількість, види обладнання та процес взаємодії між ними, є актуальним завданням.

Інфраструктура ресайклінгу має бути побудована з огляду на важливий і невід'ємний фактор – екологічну безпеку. Необхідно мінімізувати вплив небезпечних компонентів СТ на навколишнє середовище та людей. За умови невідповідного поводження та утилізації на незакритих звалищах сполуки, які містяться в складі компонентів СТ, забруднюють ґрунтові води та становлять значний ризик для довкілля та здоров'я людей [5]. Дотримання принципів безпечності допоможе не лише захистити персонал під час перероблення, але й сприятиме ефективному та екологічно відповідальному переробленню матеріалів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

На сьогодні у світовій науковій спільноті тема ресайклінгу СТ набула значного розвитку. Процес перероблення СТ часто супроводжується труднощами через недостатню дослідженість деяких аспектів і потребує залучення фахівців. Незважаючи на складність завдання, перероблення такої техніки є важливим для збереження природних ресурсів і захисту довкілля, тому воно відіграє ключову роль у забезпеченні стійкого розвитку та зменшенні негативного впливу на екосистеми [6].

Покращення управління ресайклінгом у країнах з перехідною економікою, зокрема внаслідок упровадження зелених логістичних схем, може призвести до збільшення кількості вторинної сировини на 20% до 2030 р. в таких містах, як Добой, а також оптимізувати транспортні маршрути для ефективнішого збору та перероблення [7].

Виклики та можливості у сфері поводження з пластиковими відходами в Європі пов'язані з місцем сучасного перероблення в збільшенні кількості та типів відходів, що можуть бути перероблені. Важливість розбудови раціональної інфраструктури та систем сортування є ключовим фактором для забезпечення стабільного постачання сировини, необхідного для ефективної роботи передових технологій перероблення. Успішні пілотні програми з удосконалення оптичного сортування та альтернативні методи збору сприяють підвищенню рівня перероблення [8].

Іноземний досвід має сучасний погляд на проблеми та ефективні рішення у сфері ресайклінгу СТ у нашій країні, що може бути основою для подальших досліджень і впровадження інноваційних підходів.

В Україні вивченню проблем ресайклінгу також приділено значну увагу в наукових студіях. Зокрема, українські науковці розглядали правові, технічні, економічні та соціальні аспекти ефективного управління твердими побутовими відходами в контексті особливостей економіки країни.

Ефективне управління твердими побутовими відходами в Україні потребує комплексного підходу, що охоплює як правові, технічні, економічні, так і соціальні аспекти. Водночас логістичному напряму й вітчизняному ресайклінгу СТ приділяється недостатньо уваги [9, 10].

Проблематика теми інтенсивності процесів ресайклінгу відтворює питання логістики в країні, без вирішення яких неможливо забезпечити ефективність національної системи поводження з відходами [11, 12].

Мережі замкнутої логістики та створення математичних моделей для оптимізації маршрутів перевезень відіграють ключову роль для ефективності логістичних систем, зокрема структурно-топологічні трирівневі централізовані мережі для глобальних перевезень та кільцеві маршрути для локальних перевезень [13].

Основні параметри якості логістичного обслуговування споживачів, такі як час оброблення замовлень, гарантована доставка за будь-яких умов, об'єктивність цін на логістичні послуги, є важливими критеріями для порівняння наявних інфраструктурних об'єктів та оптимізації логістичної системи ресайклінгу в Україні [14].

Особливу увагу необхідно приділити утилізації та повторному використанню компонентів авіаційних транспортних засобів. Адже утилізація великих

літаків, наприклад *Boeing-747*, може приносити значні доходи завдяки повторному використанню деталей та матеріалів, і цей процес стає важливим елементом оптимізації використання ресурсів у авіаційній галузі, оскільки вигідніше продавати літак на запчастини, ніж цілим. Тому перед авіабудівниками стоїть завдання оптимізувати кругообіг матеріалів, перетворивши сферу виробництва й використання повітряного флоту в замкнутий цикл [15].

Дослідники в галузі ресайклінгу, особливо таких складних технологій, як перероблення літій-іонних батарей (ЛІБ), активно вивчають кілька ключових питань. Поточні дослідження часто стосуються методів прямого перероблення ЛІБ, що пропонують екологічні переваги, наприклад зменшення споживання енергії та викидів у процесі утилізації, порівняно з більш традиційними методами, що впроваджуються в пірометалургії або гідрометалургії. Однак, незважаючи на досягнуті успіхи, критично важливою проблемою є створення та масштабування нових технологій перероблення від лабораторного до промислового рівня. Багато новітніх методів ще не пройшли випробування в масштабах, які б підтвердили їх комерційну життєздатність і сталість [16].

Отже, ефективне й повноцінне моделювання процесів ресайклінгу неможливе без розв'язання завдань логістики.

Визначення не розв'язаних раніше частин загальної проблеми

У процесі планування і розроблення системи ресайклінгу СТ насамперед необхідно проаналізувати найбільш поширені види перероблюваної сировини щодо перспектив і можливостей їх перероблення та повторного використання, вартості та шкідливості для навколишнього середовища тощо. Це допоможе надалі провести узагальнений аналіз підприємств, які можуть або спеціалізуватися на переробленні окремих видів компонентів СТ, або на комплексному переробленні техніки загалом, зважаючи на екологічні стандарти та можливості адаптації до місцевих умов, і, отже, описати основні елементи системи ресайклінгу СТ і зв'язки між ними. Обов'язковим завданням є також увага до витрат фінансів та часу на проєкт. Згідно з роботою [6] ресурси, що вивільняються внаслідок ресайклінгу, можуть бути додатковим джерелом отримання доходу, тому, відповідно до принципів ресурсозбереження, необхідно приділяти

особливу увагу завершальній стадії життєвого циклу СТ – утилізації. Крім того, процес ресайклінгу має відповідати нормам і критеріям щодо негативного впливу процесів перероблення на довкілля та безпосередньо робітників.

Отже, наразі не існує системної комплексної моделі інфраструктури ресайклінгу СТ, недостатньо уваги приділено питанням оптимізації інфраструктури ресайклінгу з огляду на виробничі потужності підприємства, логістичні витрати, екологічний вплив на зовнішнє середовище.

Зважаючи на вказані недоліки попередніх студій, у роботі необхідно дослідити форми організації процесів ресайклінгу СТ з виявленням їх обмежень та переваг і обґрунтуванням вибору раціонального підходу.

Беручи до уваги різноманітність компонентів і матеріалів у складі СТ, інфраструктура ресайклінгу має відповідати конкретним вимогам. Має бути передбачена координація між підприємствами з перероблення та сортування і наявність керівного органу, що забезпечить оптимізацію процесу ресайклінгу й дасть змогу мінімізувати витрати на транспортування, підвищити ефективність та безпечність процесів ресайклінгу СТ.

Визначення основних критеріїв, що характеризують процес ресайклінгу СТ, допоможе розробити таку систему, що допоможе брати до уваги й відтворювати зв'язки між різними підприємствами, їх технологічні особливості та обмеження з огляду на норми й екологічні стандарти.

Мета й завдання роботи

Отже, автори публікації ставлять за мету створити оптимізаційні моделі, які зважають на основні фактори під час формування інфраструктури ресайклінгу й поєднують централізовані та децентралізовані елементи для підвищення ефективності цього процесу. Для здійснення окресленої мети необхідно розв'язати такі завдання:

- проаналізувати сучасні підходи до організації ресайклінгу складної техніки;
- визначити критерії та фактори для оптимізації інфраструктури ресайклінгу;
- розробити багаторівневу інфраструктуру ресайклінгу;
- сформуванню моделі оптимізації інфраструктури ресайклінгу з огляду на виробничі потужності

підприємств та логістичні витрати, екологічний вплив та інші фактори.

Основна частина

Проаналізуємо підходи до організації логістичної інфраструктури ресайклінгу СТ.

1. *Централізований підхід.* Характеризується здійсненням процесів ресайклінгу із використанням виробничих потужностей великого підприємства, яке здатне обробити значний об'єм відходів.

2. *Децентралізований підхід.* Має перевагу в гнучкості та стійкості всієї системи завдяки значній кількості дрібних підприємств, що зі свого боку сприяє розвитку місцевих економік і створенню робочих місць, але потребує організації логістичних зв'язків між окремими підприємствами.

3. *Комбінований підхід.* Два попередні підходи формують підхід, що має переваги у поєднанні потужностей великого підприємства з дрібними. Комбінована структура є гнучкою, інтегрованою системою перероблення, яка адаптується до різноманітних типів відходів і локальних умов, поєднуючи великі переробні заводи з мережею маленьких локальних пунктів перероблення. Комбінований підхід дає змогу оптимізувати процеси збору, сортування, транспортування та перероблення відходів, знижуючи витрати та підвищуючи ефективність ресайклінгу.

Отже, перероблення СТ в Україні потребує створення нового підходу, що передбачає розроблення комбінованої інфраструктури, яка поєднує централізовані та розподілені елементи.

У процесі розроблення такої інфраструктури ресайклінгу СТ важливо визначити особливості видів відходів, їх властивості та потенціал для перероблення. Аналіз різних компонентів і матеріалів, що застосовуються в сучасних промислових та побутових виробках, демонструє значну різницю у можливостях їх повторного використання, вартості та складності перероблення, впливу на довкілля. У табл. 1 наведено види матеріалів, їх властивості та особливості перероблення, що дасть змогу структурувати інформацію для ефективного прийняття управлінських рішень у різних ланках логістичного ланцюга.

Унаслідок аналізу літератури [17–19] були виокремлені певні характеристики. Розглянемо їх більш детально.

Можливості перероблення. Від переплавлення металів до вилучення цінних металів із мікросхем та електронних плат можливості перероблення

значно різняться. Метали, зокрема сталь і алюміній, є одними з найпоширеніших для перероблення завдяки їх високій вартості та низькому фактору небезпеки під час перероблення. Натомість складніші компоненти, такі як акумулятори та елементи, що містять рідкісноземельні метали, вимагають більш складних процесів перероблення через наявність токсичних речовин. Перероблення мікросхем також є складним процесом, оскільки вони містять цінні метали, такі як золото, що необхідно вилучати та відновлювати.

Можливість повторного використання. Деякі матеріали, зокрема метал і скло, мають високу можливість повторного використання, тоді як інші, наприклад пластик і рідини, мають обмежені властивості через деградацію матеріалів або необхідність спеціальної утилізації.

Вартість і цінність перероблення. Вартість перероблення матеріалів також варіюється. Метали, зокрема дорогоцінні, мають високу цінність у переробленні, тоді як вартість перероблення пластику та гумових елементів може бути нижчою через їх меншу цінність.

Фактор безпеки під час перероблення. Безпека в процесі перероблення є критично важливим аспектом. Метали та скло мають низький фактор небезпеки, тоді як перероблення мікросхем, акумуляторів та рідин може бути дуже небезпечним через наявність токсичних речовин, що потребують спеціальних умов перероблення.

Вплив на довкілля під час зберігання. Неперероблені матеріали значно забруднюють довкілля: метал корозіює; мастила забруднюють ґрунт і воду; пластик і поліетилен спричиняє тривале забруднення та утворення мікропластику, що вважається серйозною екологічною проблемою; гумові елементи довго розкладаються та разом з мікросхемами й електронними платами, акумуляторами, LCD-дисплеями забруднюють токсичними речовинами.

Складність перероблення. Процес перероблення матеріалів залежить від їх фізичних та хімічних властивостей. Метал і скло є відносно легкими для перероблення, тоді як мікросхеми, рідини, акумулятори та LCD-дисплеї вимагають більш складних технологій і спеціальних умов.

Наведені в табл. 1 відомості щодо особливостей перероблення окремих компонентів СТ демонструють, що для їх перероблення необхідне впровадження спеціалізованих технологій з огляду на економічні, екологічні та безпекові фактори. Відповідно,

доцільно це брати до уваги в побудові системи виконуватимуть функцію перероблення небезпечних ресайклінгу СТ і визначенні підприємств, що компонентів СТ раціональним чином.

Таблиця 1. Види та властивості матеріалів і компонентів складної техніки

Матеріали та компоненти	Можливості перероблення	Можливість повторного використання	Ціна та цінність перероблення	Фактор небезпеки під час перероблення	Вплив на довкілля в процесі зберігання	Складність перероблення
Метал	Переплавлення для виробництва нових металевих продуктів	Висока, особливо для сталі та алюмінію	Висока, особливо для дорогоцінних металів	Низький для більшості металів	Тривала корозія та забруднення ґрунту й води	Низька
Пластик	Перероблення в нові пластикові вироби або енергію	Обмежена через деградацію матеріалу	Залежить від типу пластику; зазвичай низька	Низький, за винятком ПВХ	Тривале забруднення довкілля	Середня
Скло	Переплавлення для виробництва нового скла або інших продуктів	Висока, особливо для безбарвного скла	Середня, залежить від якості скла	Низький	Нешкідливий, але займає багато місця на звалищах	Низька
Мікросхеми	Вилучення цінних металів	Обмежена, компоненти зношуються	Висока через наявність дорогоцінних металів	Високий через токсичні речовини	Високий рівень забруднення важкими металами та хімічними речовинами	Висока
Кабелі та провідники	Вилучення металів, зокрема міді та алюмінію	Висока, особливо для міді	Висока, особливо для міді	Низький	Забруднення ґрунту та води через витік хімічних речовин з ізоляційних матеріалів	Середня
Рідини та мастила	Часто потребують спеціальної утилізації, можливість вторинного використання як палива	Обмежена, залежно від складу	Залежить від складу; зазвичай низька	Високий через можливі токсичні компоненти	Забруднення водних ресурсів та ґрунтів токсичними речовинами	Висока
Гумові елементи	Перероблення для подальшого використання, наприклад, у складі дорожнього покриття	Обмежена через зношування матеріалу	Залежить від типу гуми; зазвичай середня	Низький, але може містити токсичні домішки	Тривале розкладання, виділення токсичних речовин	Середня
Оптичні компоненти	Перероблення оптичного скла або пластику в нові оптичні прилади	Обмежена, технологічно складно	Висока для якісних матеріалів	Низький до середнього, залежно від матеріалів	Забруднення довкілля складними матеріалами	Висока
Поліетилен	Перероблення в нові пластикові вироби, зокрема пакувальні матеріали	Використання у виготовленні сумок, контейнерів	Залежно від ринку; висока цінність у переробленні пакувальні матеріали	Низький ризик, простий процес	Тривале забруднення, можливе утворення мікропластику	Низька
Електронні плати	Вилучення цінних металів (золото, срібло, мідь)	Обмежене повторне використання через знос компонентів	Висока вартість через цінні метали	Високий ризик через токсичні речовини	Забруднення ґрунту й води	Висока
Акумулятори	Перероблення на нові акумулятори або вилучення хімічних компонентів	Вторинне використання після перезарядження	Висока, через складність та вартість перероблення матеріалів	Високий, потребує обережного поводження через токсичність	Забруднення ґрунту та води токсичними речовинами, зокрема свинцем і кислотами	Висока
LCD-дисплеї	Вилучення скла та інших матеріалів	Обмежена, через складність демонтажу без пошкодження	Середня цінність, залежить від якості матеріалів	Помірний, потребує обережності через наявність ртуті в деяких моделях	Забруднення важкими металами та ґрунто	Середня

Побудова ефективного механізму управління логістичною системою підприємств із перероблення переслідує мету оптимізувати та вдосконалити вже наявну логістичну систему. Це передбачає інтеграцію різних видів підприємств, що відрізняються своїми функціями, масштабом і ступенем централізації.

Інфраструктура ресайклінгу СТ має багаторівневу структуру, яка поєднує централізовані та децентралізовані елементи. Її можна умовно поділити на три основні рівні (рис. 1):

1) верхній рівень – регламентуючий орган, що відповідає за координацію процесів ресайклінгу та контроль за ними на загальнодержавному рівні;

2) середній рівень – підприємства з перероблення (ПП) відходів. Вони можуть бути вузькоспеціалізованими або широкого профілю, які переробляють різні види відходів;

3) нижній рівень – сортувальні підприємства (СП), що займаються первинним обробленням відходів: збором, сортуванням і підготовкою до подальшого перероблення.

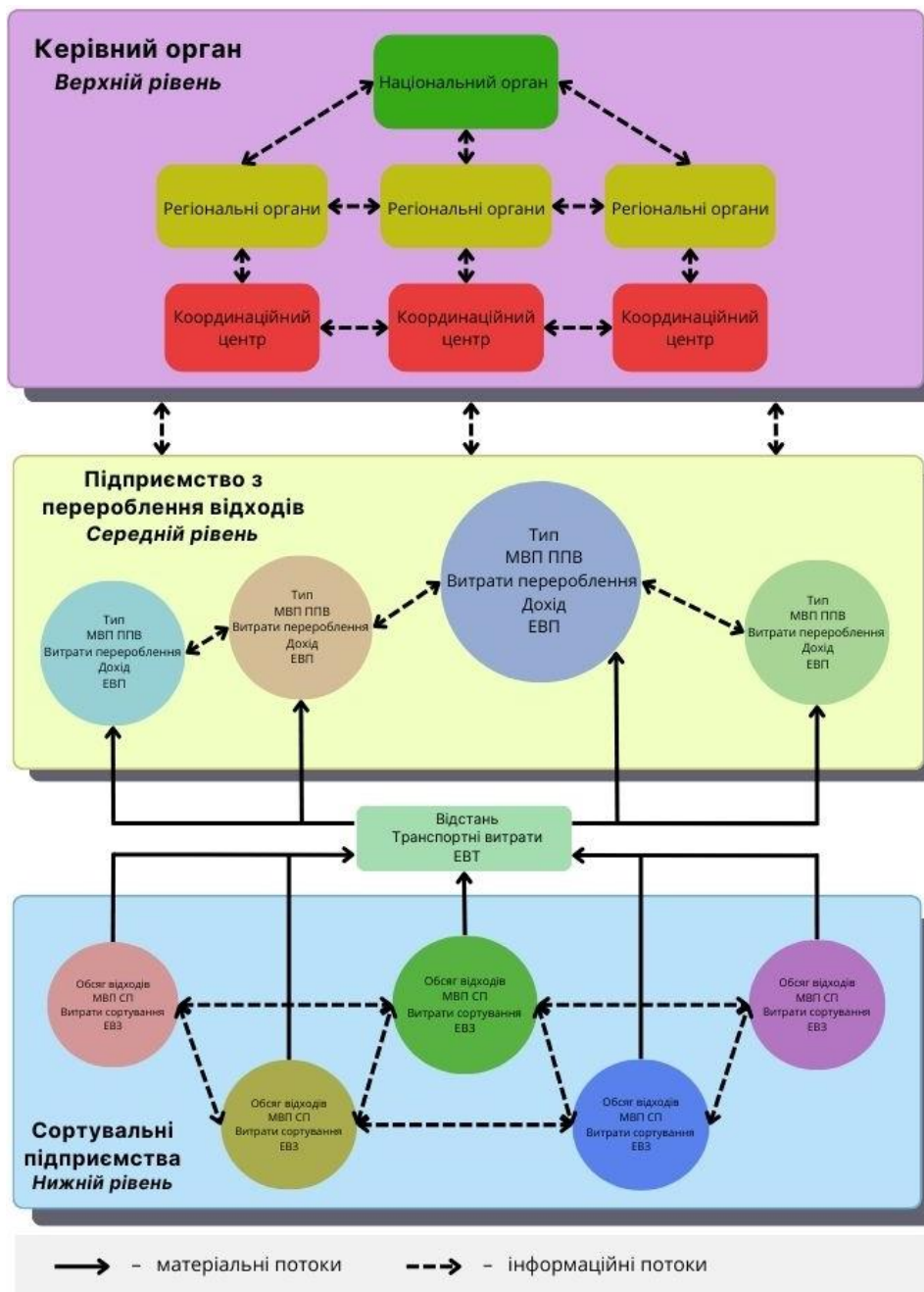


Рис. 1. Рівні ієрархії та параметри елементів інфраструктури ресайклінгу складної техніки

Розглянемо детально складники та параметри зазначених рівнів.

Верхній рівень. Інфраструктурі необхідно мати ефективний керівний апарат (КА) для планування та координації ресайклінгу СТ в Україні. Він має бути створений з ланцюга підструктур, що відповідають за свій сектор, а саме:

1) національний орган – відповідальний за розроблення національної стратегії управління відходами, координацію з регіональними агентствами та впровадження політик, пов'язаних із ресайклінгом;

2) регіональні органи – працюють безпосередньо в областях і керують впровадженням національної політики на місцевому рівні. Також слідкують за збором та переробленням складної техніки, взаємодіють із місцевими організаціями та підприємствами, стежать за дотриманням стандартів і ведуть облік;

3) координаційний центр – забезпечує взаємодію між різними учасниками ринку ресайклінгу: виробниками, переробними підприємствами та громадськістю.

Одними із ключових завдань КА є розроблення та впровадження сучасних ІТ-систем для ефективного моніторингу та управління процесами, а також інтеграція з міжнародними стандартами й практиками. Співпраця з європейськими організаціями відчиняє двері для міжнародного фінансування та партнерства.

Середній рівень. Після первинного оброблення та сортування відходи транспортуються на підприємства з перероблення, що відповідають середньому рівню структури. Для забезпечення ефективного збору та доставки відпрацьованих пристроїв від джерел їх утворення до центрів перероблення важливо визначити оптимальні маршрути й розклади транспортування. Цей логістичний процес передбачає увагу до відстаней, часу транспортування, об'єму вантажу, доступності та можливостей транспортних мереж.

Підприємства можуть бути як централізованими (великі заводи з широким спектром перероблення різноманітних відходів), так і вузькоспеціалізованими (наприклад, підприємства з перероблення батарейок або акумуляторів, чи промислових відходів з увагою на екологічно чистих методах перероблення).

Централізовані підприємства матимуть більші виробничі потужності та зможуть переробляти значні об'єми відходів різних видів. Водночас вузькоспеціалізовані підприємства будуть зосереджені на конкретних видах відходів, що дасть змогу їм досягти більшої ефективності та глибини перероблення. Усі вони мають бути оснащені відповідним технологічним обладнанням, таким як розбірні лінії,

печі для плавлення металів, установки для вилучення цінних компонентів, системи очищення та нейтралізації токсичних речовин тощо.

Компоненти системи ресайклінгу СТ на різних рівнях визначаються різними параметрами. Середній рівень системи ресайклінгу СТ можна характеризувати таким набором параметрів:

тип – тип підприємства з перероблення (централізоване, вузькоспеціалізоване);

МВП ППВ – максимальна виробнича потужність підприємства з перероблення відходів, тобто максимальний об'єм відходів, який воно може переробити за певний період (зазвичай за рік). Одиниці виміру: т/рік або м³/рік;

витрати перероблення – витрати на перероблення одиниці відходів на певному підприємстві. Передбачають витрати на персонал, енергію, обладнання, утилізацію відходів тощо. Одиниці виміру: грн/т або грн/м³;

дохід – дохід, який підприємство отримує від реалізації продуктів перероблення (вторинної сировини, матеріалів тощо) з одиниці перероблених відходів. Одиниці виміру: грн/т або грн/м³;

ЕВП – екологічний вплив процесу перероблення на певному підприємстві, що має викиди, утворює небезпечні відходи, споживає чимало енергії тощо. Вимірюється у відповідних одиницях (наприклад, CO₂-екв/рік для викидів парникових газів).

Нижній рівень. На цьому рівні передбачається створення мережі сортувальних підприємств, які будуть розташовані в різних регіонах країни. Необхідно, щоб вони мали необхідні технічні та технологічні засоби, такі як демонтажне обладнання, сортувальні лінії, обладнання для попереднього перероблення, технології використання вторинної сировини, моніторингові та управлінські системи. Таке обладнання можуть мати як централізовані, так і децентралізовані підприємства залежно від конкретних умов і вимог. Крім того, ці підприємства можуть відігравати роль у впровадженні вдосконалених технологій сортування та розділення відходів для забезпечення ефективності подальшого їх перероблення.

Сортувальні підприємства можуть різнитися за своїми виробничими потужностями та спеціалізацією. Їх характеристики визначатимуться об'ємами утворення відходів у регіоні та логістичними можливостями.

Важливою умовою функціонування сортувальних підприємств є наявність відповідної інфраструктури для прийому відходів від населення та організацій. Це можуть бути як стаціонарні пункти прийому,

пересувні пункти збору, так і програми збору відходів безпосередньо від споживачів тощо.

Також важливо, щоб ця умова охоплювала виробників СТ. Вони мають бути оснащені контейнерами або спеціалізованою інфраструктурою для прийому відпрацьованих пристроїв від споживачів. Для залучення споживачів і покращення збору техніки доцільно запровадити програми стимулювання, такі як обмін відпрацьованої техніки з відповідною знижкою на нову, програми підтримки повторного продажу старої, але ще робочої техніки через інтернет-платформи або магазини, організація безкоштовного вивезення техніки з дому. Ця програма дає змогу споживачам ефективно утилізувати свою стару техніку, запобігаючи її потраплянню на сміттєзвалище та сприяючи вторинному використанню ресурсів. Компоненти системи ресайклінгу СТ на різних рівнях визначаються різними параметрами. Для нижнього рівня властиві такі параметри:

об'єм відходів – кількість відходів, що надходить на сортувальне підприємство від джерел утворення (населення, організацій тощо) у певному регіоні. Одиниці виміру: т/рік або м³/рік;

МВП СП – максимальна виробнича потужність сортувального підприємства, тобто граничний об'єм відходів, який воно може прийняти та відсортувати за певний період часу. Одиниці виміру: т/рік або м³/рік;

витрати сортування – витрати на збір та сортування одиниці відходів на певному СП. Передбачають витрати на персонал, обладнання, транспортування, утилізацію відходів тощо. Одиниці виміру: грн/т або грн/м³;

ЕВЗ – екологічний вплив процесів збору відходів на певному підприємстві, пов'язаний із викидами від транспорту, утворенням відходів тощо. Вимірюється у відповідних одиницях.

Зв'язки. Між різними рівнями та елементами інфраструктури ресайклінгу існують логістичні зв'язки, що забезпечують взаємодію та обмін матеріальними та інформаційними потоками. Організація та координація руху вантажів, забезпечення їх відправлення і прийому мають бути вчасними й безперервними. Це передбачає складання та виконання графіків транспортування, управління складськими запасами, а також розв'язання будь-яких проблем або затримок, що виникають під час транспортування.

Сортувальні підприємства постачають відсортовані відходи на підприємства з перероблення. У цьому разі важливим фактором буде відстань між цими

підприємствами, що впливатиме на вартість транспортування. Тому в плануванні інфраструктури необхідно зважати на оптимальне розміщення сортувальних та переробних підприємств для мінімізації логістичних витрат.

Підприємства з перероблення постачають вторинну сировину й матеріали на ринок або на подальше перероблення. Важливим аспектом є налагодження ефективних каналів збуту для продукції ресайклінгу, що дасть змогу підвищити економічну ефективність усієї системи.

Зв'язки між середнім і нижнім рівнями системи ресайклінгу СТ визначаються насамперед таким набором параметрів:

відстань – відстань між СП і ПП, що впливає на витрати та екологічний вплив транспортування відходів. Одиниці виміру: кілометри;

транспортні витрати – витрати на транспортування одиниці відходів між СП і ПП. Залежать від відстані, виду транспорту, вартості палива тощо. Одиниці виміру: грн/т або грн/м³;

ЕВТ – екологічний вплив транспортування відходів між підприємствами – пов'язаний, зокрема, з викидами від транспортних засобів, споживанням палива тощо. Може вимірюватися, наприклад, у тоннах CO₂-екв/км.

Для оптимізації запропонованої інфраструктури ресайклінгу СТ може бути використана математична модель, що містить різні фактори, а саме: виробничі потужності підприємств, логістичні витрати, екологічний вплив тощо. Зазначені фактори можуть бути формалізовані як у цільовій функції, так і в обмеженнях. Отже, можна побудувати різні моделі оптимізації та обрати саме ту, що буде ефективною для виконання пріоритетних завдань комплексного перероблення СТ.

Для побудови оптимізаційних моделей, що мають покращити основні показники системи ресайклінгу СТ, такі як дохід, витрати та екологічний вплив, необхідно зважати на низку параметрів. З огляду на технологічні та економічні характеристики процесів перероблення відходів запропоновано математичні моделі з такими параметрами:

R – дохід від реалізації кінцевого продукту ресайклінгу;

V – об'єм відходів, які підлягають ресайклінгу;

C – витрати на ресайклінг відходів;

D – відстань між локальними пунктами збору та сортування і підприємствами з перероблення;

E – оцінка впливу процесів ресайклінгу на навколишнє середовище;

T – час, необхідний для проведення ресайклінгу.

Зважаючи на мережну структуру системи підприємств ресайклінгу, запропонуємо позначки, що дадуть змогу розглянути її складники:

i – порядковий номер виду відходу, $i = 1 \dots n$;

n – кількість видів відходів, що підлягають збору, сортуванню і переробленню;

j – порядковий номер локального пункту зі збору й сортування (ЛПЗС), $j = 1 \dots J$;

J – кількість локальних пунктів ЛПЗС;

k – порядковий номер підприємства з перероблення (ПП), $k = 1 \dots K$;

K – кількість підприємств з перероблення.

Подано інфраструктуру ресайклінгу СТ, запропоновану на рис. 1, у формалізованому вигляді (рис. 2). Позначки на рис. 2 відповідають описаним вище показникам.

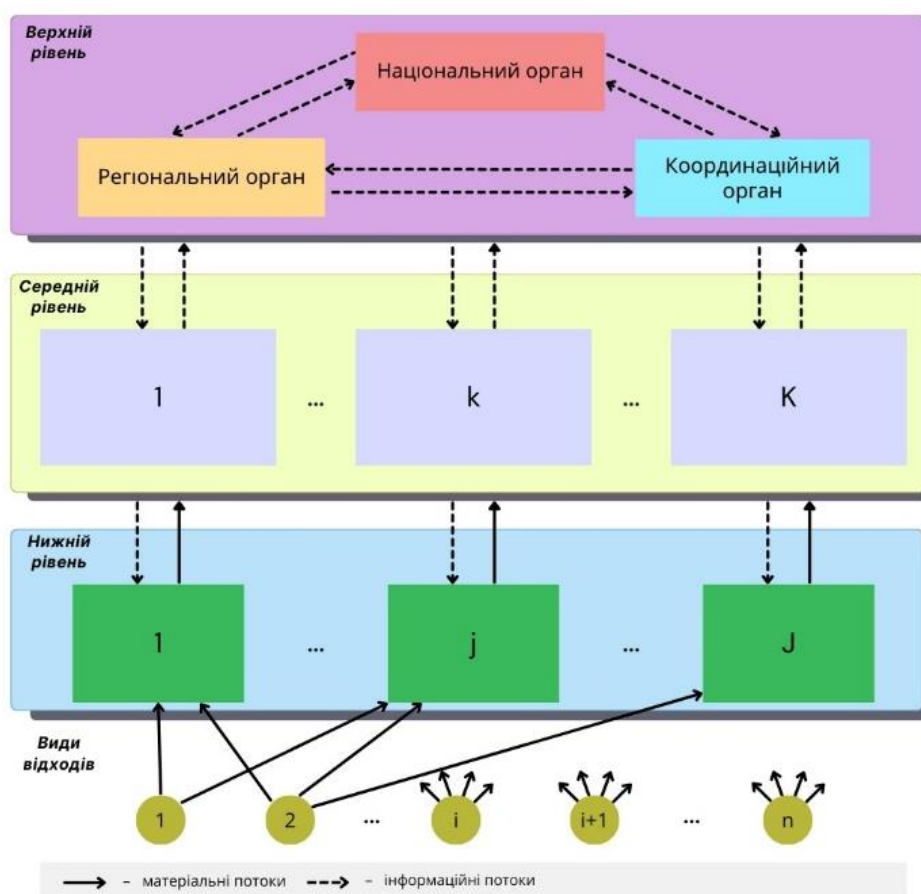


Рис. 2. Структурна модель інфраструктури ресайклінгу складної техніки

Відповідно, основні фактори в моделі ресайклінгу подамо таким чином:

r_k – дохід від продажу переробленої продукції на k -му ПП;

v_k – об'єм готової продукції, виробленої на k -му ПП;

v_{ij} – об'єм відходів i -го виду, що збирається та сортується в j -му ЛПЗС;

v_{ijk} – об'єм відходів i -го виду, що транспортується з j -го ЛПЗС до k -го ПП;

v_{ik} – об'єм відходів i -го виду, що переробляється на k -му ПП;

d_{jk} – відстань від j -го ЛПЗС до k -го ПП;

c_{ij} – витрати на збір і сортування одиниці об'єму відходів i -го виду в j -му ЛПЗС;

c_{ijk} – витрати на транспортування одиниці об'єму i -го виду відходів з j -го ЛПЗС до k -го ПП;

c_{ik} – витрати на перероблення одиниці об'єму відходів i -го виду на k -му ПП;

e_{ij} – ЕВЗ, екологічний вплив під час збору та сортування одиниці об'єму відходів i -го виду в j -му ЛПЗС;

e_{ijk} – ЕВТ, екологічний вплив під час транспортування відходів одиниці об'єму i -го виду з j -го ЛПЗС до k -го ПП;

e_{ik} – ЕВП, екологічний вплив під час перероблення одиниці об'єму відходів i -го виду на k -му ПП.

Сформуємо локальні цільові функції для можливих задач оптимізації ресайклінгу СТ у вигляді, поданому нижче.

1. Мінімізація витрат на збір відходів у локальних пунктах:

$$C_{col} = \sum_{j=1}^J \sum_{i=1}^n c_{ij} v_{ij} b_{ij} \rightarrow \min, \quad (1)$$

де b_{ij} – цілочисельна (булева) змінна:

$$b_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{якщо здійснюється збір та сортування} \\ & i\text{-го виду відходів на } j\text{-му ЛПЗС,} \\ 0, & \text{якщо не здійснюється.} \end{cases} \quad (2)$$

Мінімізація витрат на транспортування:

$$C_{tr} = \sum_{k=1}^K \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^J c_{ijk} d_{jk} v_{ijk} b_{jk} \rightarrow \min, \quad (3)$$

де b_{jk} – цілочисельна (булева) змінна:

$$b_{jk} = \begin{cases} 1, & \text{якщо наявний маршрут перевезень} \\ & \text{від } j\text{-го ЛПЗС до } k\text{-го ПП,} \\ 0, & \text{якщо маршрут відсутній.} \end{cases} \quad (4)$$

Мінімізація витрат на перероблення:

$$C_{proc} = \sum_{i=1}^n c_{ik} v_{ik} b_{ik} \rightarrow \min, \quad (5)$$

де b_{ik} – цілочисельна (булева) змінна:

$$b_{ik} = \begin{cases} 1, & \text{якщо здійснюється перероблення} \\ & i\text{-го виду відходів на } k\text{-му ПП,} \\ 0, & \text{якщо не здійснюється.} \end{cases} \quad (6)$$

Тоді узагальнена цільова функція мінімізації витрат на ресайклінг СТ матиме вигляд:

$$C = C_{col} + C_{tr} + C_{proc} \rightarrow \min. \quad (7)$$

2. Цільова функція максимізації доходів від переробленої продукції має такий вигляд:

$$R = \sum_{k=1}^K r_k v_k \rightarrow \max. \quad (8)$$

3. Окрім цільові функції екологічного впливу під час збору та сортування (E_{col}), транспортування (E_{tr}) та перероблення (E_{proc}), відповідно, мають вигляд:

$$E_{col} = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^J e_{ij} v_i b_{ij} \rightarrow \min; \quad (9)$$

$$E_{tr} = \sum_{k=1}^K \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^J e_{ijk} v_{ijk} b_{jk} \rightarrow \min; \quad (10)$$

$$E_{proc} = \sum_{k=1}^K \sum_{i=1}^n e_{ik} v_{ik} b_{ik} \rightarrow \min. \quad (11)$$

Узагальнена цільова функція мінімізації екологічного впливу має такий вигляд:

$$E = E_{col} + E_{tr} + E_{proc} \rightarrow \min. \quad (12)$$

Необхідно зважати на основні обмеження в задачі оптимізації, а саме:

1) кожен j -й локальний пункт ЛПЗС має обмеження за об'ємом відходів, що можуть бути перероблені за певний період:

$$\sum_{i=1}^n v_{ij} \leq V_{j \max}, \quad (13)$$

де $V_{j \max}$ – максимальний об'єм відходів, який може бути перероблений на j -му ЛПЗС за певний період;

2) централізовані заводи ПП мають обмеження за загальним об'ємом перероблення:

$$\sum_{i=1}^n v_{ik} \leq V_{k \max}, \quad (14)$$

де $V_{k \max}$ – максимальний об'єм відходів, що може бути перероблений на k -му ПП за певний період;

3) екологічні обмеження встановлюють максимально допустимий рівень впливу на довкілля, а саме:

$$E_{col} \leq E_{col \max}, \quad (15)$$

де $E_{col \max}$ – максимально припустимий вплив на довкілля під час збору та сортування на ЛПЗС;

$$E_{tr} \leq E_{tr \max}, \quad (16)$$

де $E_{tr \max}$ – максимально припустимий вплив на довкілля під час транспортування з ЛПЗС на ПП;

$$E_{proc} \leq E_{proc \max}, \quad (17)$$

де $E_{proc \max}$ – максимально припустимий вплив на довкілля під час перероблення на ПП.

Результати досліджень та їх обговорення

Залежно від умов і комбінації видів відходів можуть бути використані різні постановки оптимізаційної задачі та обмежень, але, на думку авторів, саме цільова функція мінімізації витрат на ресайклінг з огляду на обмеження, що характеризують виробничі потужності нижньої та середньої ланки підприємств з перероблення та дотримання вимог захисту довкілля й безпеки на виробництві, є найбільш актуальним завданням для більшості підприємств.

Можна виокремити кілька напрямів ресайклінгу СТ.

1. Знищення та поховання техніки. У цьому разі можливий значний негативний вплив на довкілля.

Особливістю цього напрямку є відсутність прибутку від реалізації проекту.

2. Комерціалізація ресайклінгу. Передбачає розбирання СТ на складники, оцінювання технічного стану, ремонт, модернізацію, зберігання та продаж. Цей напрям найбільш раціональний у процесі ресайклінгу СТ.

3. Перероблення СТ у вторинну сировину, яку можна використати повторно для створення нових зразків СТ.

Саме в разі перероблення високоприбуткових видів відходів (2-й і частково 3-й напрями) можливою є цільова функція максимізації доходу з огляду на обмеження витрат та екологічний вплив. Як приклад може бути розглянуто проєкт утилізації літака *Boeing-747* [15].

У цьому разі основними критеріями, що характеризують цей проєкт і використовуються в оптимізаційній моделі, є:

– цільова функція $max R$ – дохід від утилізації літака;

– обмеження C – фінансові витрати проєкту утилізації,

– E – критерій безпеки, що визначає вплив технологічного процесу та об'єкта ресайклінгу на довкілля і оператора.

Обмеженням цієї моделі є те, що вона не бере до уваги в явному вигляді часовий параметр, а саме витрати часу на виконання проєкту ресайклінгу СТ у межах сформованої інфраструктури.

Безумовно, бажано також зважати і на якість отриманої сировини та ризики утилізації. Крім цього, на етапі формалізації модель не бере до уваги втрати, що виникають під час технологічних процесів збору, сортування, транспортування та перероблення відходів.

Висновки

Ефективне управління процесами ресайклінгу складної техніки є актуальним завданням з огляду на необхідність сталого розвитку та збереження довкілля. У цій роботі проаналізовано підходи до організації

інфраструктури ресайклінгу складної техніки та запропоновано створення комбінованої системи, що поєднує централізовані та розподілені елементи.

Розроблена структурна модель інфраструктури ресайклінгу передбачає три основні рівні: нижній – сортувальні підприємства, середній – підприємства з перероблення відходів, верхній – керівний апарат для координації та контролю процесів.

Багаторівнева логістична інфраструктура ресайклінгу СТ має переваги, серед яких: гнучкість та стійкість системи завдяки поєднанню централізованих і децентралізованих елементів; мінімізація витрат на транспортування та підвищення ефективності всієї системи; належний контроль і координація процесів ресайклінгу для забезпечення екологічних вимог.

Отже, науковою новизною цієї статті є розроблення структурної та комплексу оптимізаційних моделей інфраструктури ресайклінгу СТ, які, на відміну від наявних, відтворюють ієрархічну структуру та беруть до уваги основні виробничо-економічні показники та екологічні вимоги процесів утилізації.

Упровадження математичної моделі оптимізації дає змогу зважати на виробничі потужності підприємства, логістичні витрати, екологічний вплив тощо й обрати найбільш ефективну конфігурацію логістичної інфраструктури відповідно до поставлених цілей проєкту ресайклінгу.

Реалізація запропонованої інфраструктури ресайклінгу вимагатиме злагодженої взаємодії між державними органами, підприємствами, громадськими організаціями та міжнародними партнерами.

Перспективним напрямом дослідження є створення сучасної системи управління з дотриманням вимог *INDUSTRY 4.0* та цифрової трансформації виробництва із перероблення та утилізації складної техніки.

Успішне впровадження цього підходу не лише допоможе вирішити проблему накопичення відходів складної техніки в Україні, а й створить нові робочі місця, стимулюватиме розвиток інновацій та підвищить ресурсоефективність економіки загалом, забезпечуючи сталий розвиток нашої країни.

Список літератури

1. Jorgensen F. Recycling. 2019. URL: https://books.google.com.ua/books?hl=ru&lr=&id=NCC4DwAAQBAJ&oi=fnd&pg=PR7&dq=recycling+what+is+it&ots=OtU5NWUYyB&sig=ks-PHTbp1X3tzEjRpFGHyAuzN6E&redir_esc=y#v=onepage&q=recycling%20what%20is%20it&f=false
2. Soto G. What is Infrastructure? Origins, turns and continuities of the concept. 2023. URL: https://www.scielo.cl/pdf/arq/n114/en_0717-6996-arq-114-4.pdf

3. The American heritage. Dictionary of the English Language, fifth edition. 2022. URL: <https://ahdictionary.com/word/search.html?q=infrastructure>
4. Круковська О. Логістика як інструмент ринкової економіки. *Серія: Економіка*, №19. 2024. С. 69–76. DOI: 10.32782/2708-0366/2024.19.9 (дата звернення: 4.04.2024).
5. Yken J., Boxall N., Cheng K., Nikoloski A, Moheimani N., Kaksonen A. E-Waste Recycling and Resource Recovery: A Review on Technologies, Barriers and Enablers with a Focus on Oceania. *MDPI*, 2021. Vol. 11. №8. P. 1313. DOI: 10.3390/met11081313
6. Білокінь Ю. А. Моделі і метод формування комплексу робіт в проектах утилізації авіаційної техніки: дис. канд. техн. наук: 05.13.22. Нац. аерокосм. ун-т ім. М.С. Жуковського "Харк. авіац. ін-т". Х., 2011. 209 с.
7. Novarlic B., Duric P. Enhancing Comprehensive Waste Management in Transition Economies through Green Logistics: A Case Study of Bosnia and Herzegovina. 2024. Vol. 3. №1. P. 42–55 URL: https://library.acadlore.com/JIMD/2024/3/1/JIMD_03.01_04.pdf
8. Parashar N., Hait S. Plastic Waste Management: Current Overview and Future Prospects. 2022. *Springer*, Vol. 104. P. 471–494. DOI: 10.1007/978-3-030-95542-7_22
9. Malovanyi G. Analysis of the socio-economic situation in Ukraine regarding the handling and processing of solid household waste (SHW). 2024. *Scientific Notes of Ostroh Academy National University, "Economics" series*, Vol. 32. № 60. P. 29–36, DOI: [https://doi.org/10.25264/2311-5149-2024-32\(60\)-29-36](https://doi.org/10.25264/2311-5149-2024-32(60)-29-36)
10. Харченко Т., Сагайдак Ю. Удосконалення системи переробки твердих побутових відходів в Україні. 2014. *Серія: Економіка*. № 165. С. 41–46. URL: http://bulletin-econom.univ.kiev.ua/wp-content/uploads/2015/11/165_41-46.pdf
11. Гобела В., Ганкевич І. Особливості застосування логістики рециклінгу на підприємстві. 2023. С. 26–28. URL: https://dSPACE.lvduvs.edu.ua/bitstream/1234567890/5724/1/12_05_2023.pdf
12. Білявський О. Проблеми утилізації твердих побутових відходів в Україні та методи їх вирішення. 2023. *Стратегія економічного розвитку України*. Vol. 52. С. 72–83. DOI: 10.33111/sedu.2023.52.072.083
13. Khrutba Y., Paranych P., Idziiev T. Сучасний стан та особливості розвитку ринку логістичних послуг в Україні. 2020. *Сучасний стан наукових досліджень та технологій в промисловості*. Vol. 4. № 14. С. 129–136. DOI:10.30837/ITSSI.2020.14.129
14. Beskorovainyi V., Kuropatenko O., Gobov D. Оптимізація маршрутів перевезень у системі замкненої логістики. 2019. *Сучасний стан наукових досліджень та технологій в промисловості*. Vol. 4. № 10. С. 24–32. DOI: 10.30837/2522-9818.2019.10.024
15. Бойченко С., Іванченко О., Яковлева А. Рециклінг і утилізація авіаційної техніки: світові тенденції та особливості впровадження. *Наукоємні технології*. Т. 34. № 2 (2017). С. 140-149. DOI: 10.18372/2310-5461.34.11612
16. Zanoletti A., Carena E., Ferrara C. Bontempi E. A Review of Lithium-Ion Battery Recycling: Technologies, Sustainability, and Open Issues. 2024. *MDPA*, Vol. 10. №1. 38 p. DOI: 10.3390/batteries10010038
17. Efstratiadis V., Michailidis N. Sustainable Recovery, Recycle of Critical Metals and Rare Earth Elements from Waste Electric and Electronic Equipment (Circuits, Solar, Wind) and Their Reusability in Additive Manufacturing Applications: A Review. 2022. *MDPA*, Vol. 12. №5. P. 794. DOI: 10.3390/met12050794
18. Hamawand I., Yusaf T., Rafat S. Recycling of Waste Engine Oils Using a New Washing Agent. 2013. *MDPA*, Vol. 6. №2. P. 1023–1049. DOI: 10.3390/en6021023
19. Wen X., Jianhong Y., Huaiying F., Jiangteng Z., Yuedong K. Classifying construction and demolition waste by combining spatial and spectral features. 2020. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers*. Vol. 173. №3. P. 79–90. DOI: 10.1680/jwarm.20.00008

References

1. Jorgensen, F. (2019), "Recycling". available at: https://books.google.com.ua/books?hl=ru&lr=&id=NCC4DwAAQBAJ&oi=fnd&pg=PR7&dq=recycling+what+is+it&ots=OTU5NWUYyB&sig=ks-PHTbp1X3tEjRpFGHyAuzN6E&redir_esc=y#v=onepage&q=recycling%20what%20is%20it&f=false
2. Soto, G. (2023), "What is Infrastructure? Origins, turns and continuities of the concept". available at: https://www.scielo.cl/pdf/arq/n114/en_0717-6996-arq-114-4.pdf
3. "The American heritage. Dictionary of the English Language, fifth edition". (2022), available at: <https://ahdictionary.com/word/search.html?q=infrastructure>

4. Krukovska, O. (2024), "Logistics as a tool of market economy". *Series: Economics*, No. 19. P. 69–76. DOI: 10.32782/2708-0366/2024.19.9
5. Yken, J., Boxall, N., Cheng, K., Nikoloski, A., Moheimani, N., Kaksonen, A. (2021), "E-Waste Recycling and Resource Recovery: A Review on Technologies, Barriers and Enablers with a Focus on Oceania". *MDPI*, Vol. 11. No. 8. P. 1313. DOI: 10.3390/met11081313
6. Bilokin, Y. (2011), "Models and method of formation of work complex in aircraft recycling project", Ph. D. Thesis., Kharkiv, 209 p.
7. Novarlic, B., Duric, P. (2024), "Enhancing Comprehensive Waste Management in Transition Economies through Green Logistics: A Case Study of Bosnia and Herzegovina". Vol. 3. No. 1. P. 42–55 available at: https://library.acadlore.com/JIMD/2024/3/1/JIMD_03.01_04.pdf
8. Parashar, N., Hait, S. (2022), "Plastic Waste Management: Current Overview and Future Prospects". *Springer*, Vol. 104. P. 471–494. DOI: 10.1007/978-3-030-95542-7_22
9. Malovanyi, G. (2024), "Analysis of the socio-economic situation in Ukraine regarding the handling and processing of solid household waste (SHW)". *Scientific Notes of Ostroh Academy National University, "Economics" series*, Vol. 32. No. 60. P. 29–36 DOI: [https://doi.org/10.25264/2311-5149-2024-32\(60\)-29-36](https://doi.org/10.25264/2311-5149-2024-32(60)-29-36)
10. Kharchenko, T., Sahaidak, Y. (2014), "Improving the system of solid waste recycling in Ukraine". *Series: Economics*. No. 165. P. 41–46. available at: http://bulletin-econom.univ.kiev.ua/wp-content/uploads/2015/11/165_41-46.pdf
11. Gobela, V., Gankevich, I. (2023), "Features of recycling logistics application at the enterprise". P. 26–28. available at: https://dSPACE.lvduvs.edu.ua/bitstream/1234567890/5724/1/12_05_2023.pdf
12. Bilyavsky, O. (2023), "Problems of Solid Waste Disposal in Ukraine and Methods of Their Solution". *Strategy of economic development of Ukraine*. Vol. 52. P. 72–83. DOI: 10.33111/sedu.2023.52.072.083
13. Khrutba, Y., Paranich, P., Idziiev, T. (2020), "Current state and peculiarities of development of the logistics services market in Ukraine". *Innovative Technologies and Scientific Solutions for Industries*. Vol. 4. No. 14. P. 129–136. DOI:10.30837/ITSSI.2020.14.129
14. Beskorovainyi, V., Kuropatenko, O., Gobov, D. (2019), "Optimization of transportation routes in the closed logistics system". *Innovative Technologies and Scientific Solutions for Industries*. Vol. 4. No. 10. P. 24–32. DOI: 10.30837/2522-9818.2019.10.024
15. Boichenko, S., Ivanchenko, O., Iakovlieva, A. (2017) "Recycling and utilization of aviation engineering: the global trends and peculiarities of introduction", *Science-Based Technologies*. Vol. 34. No. 2. P. 140-149. DOI: 10.18372/2310-5461.34.11612
16. Zanoletti, A., Carena, E., Ferrara, C. Bontempi, E. (2024), "A Review of Lithium-Ion Battery Recycling: Technologies, Sustainability, and Open Issues". *MDPA*, Vol. 10. No. 1. P. 38 DOI: 10.3390/batteries10010038
17. Efstratiadis, V., Michailidis, N. (2022), "Sustainable Recovery, Recycle of Critical Metals and Rare Earth Elements from Waste Electric and Electronic Equipment (Circuits, Solar, Wind) and Their Reusability in Additive Manufacturing Applications: A Review". *MDPA*, Vol. 12. No. 5. P. 794. DOI: 10.3390/met12050794
18. Hamawand, I., Yusaf, T., Rafat, S. (2013), "Recycling of Waste Engine Oils Using a New Washing Agent". *MDPA*, Vol. 6. No. 2. P. 1023–1049. DOI: 10.3390/en6021023
19. Wen, X., Jianhong, Y., Huaiying, F., Jiangteng, Z., Yuedong, K. (2020), "Classifying construction and demolition waste by combining spatial and spectral features". *Proceedings of the Institution of Civil Engineers*. Vol. 173. No. 3. P. 79–90. DOI: 10.1680/jwarm.20.00008

Надійшла (Received) 15.08.2024

Відомості про авторів / About the Authors

Кікоть Максим Сергійович – Національний аерокосмічний університет імені М. Є. Жуковського "ХАІ", аспірант кафедри комп'ютерних наук та інформаційних технологій, Харків, Україна; e-mail: maxum111111@gmail.com; ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0005-7554-9246>

Малєєва Юлія Анатоліївна – кандидат технічних наук, Національний аерокосмічний університет імені М. Є. Жуковського "ХАІ", доцент кафедри комп'ютерних наук та інформаційних технологій, Харків, Україна; e-mail: juliabelokon84@gmail.com; ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-3553-9156>

Kikot Maksym – National Aerospace University "Kharkiv Aviation Institute" named after M. E. Zhukovsky, PhD student at the Department of Computer Science and Information Technologies, Kharkiv, Ukraine.

Malieieva Julia – PhD (Engineering Sciences), National Aerospace University "Kharkiv Aviation Institute" named after M. E. Zhukovsky, Associate Professor at the Department of Computer Science and Information Technologies, Kharkiv, Ukraine.

MODELS OF FORMING LOGISTICS INFRASTRUCTURE FOR COMPLEX EQUIPMENT RECYCLING

Subject matter: models for forming the logistics infrastructure for complex equipment recycling. The work aims to create optimization models that consider key factors in forming recycling infrastructure and combine centralized and decentralized elements to enhance the efficiency of this process. **Tasks:** analyze modern approaches to organizing complex equipment recycling; identify criteria and factors for optimizing recycling infrastructure; develop a multi-level recycling infrastructure; formulate optimization models for recycling infrastructure, taking into account enterprise production capacities, logistical costs, environmental impact, and other factors. **Methods:** a systems approach, structural modeling, optimization models. **Research results:** approaches to organizing recycling infrastructure were analyzed: centralized, distributed, and combined; the selection of a combined approach for creating logistics infrastructure for complex equipment recycling was justified; a structural multi-level model of recycling infrastructure was developed with a lower level (sorting enterprises), middle level (processing enterprises), and upper level (organizational management); mathematical models for optimizing recycling infrastructure were formulated, considering enterprise production capacities, logistical costs, and environmental impact. **The conclusions:** proposed structural multi-level model of complex equipment recycling infrastructure combines the advantages of centralized and decentralized management, ensuring flexibility, system reliability against external influences, cost minimization, and sustainable process control. The application of the developed optimization models allows for consideration of enterprise production capacities, logistical costs, environmental impact, and other factors to find the most effective configuration of recycling infrastructure. Implementation of the proposed recycling infrastructure will ensure the formation of coherent interaction between government bodies, enterprises, public organizations, and international partners.

Keywords: complex equipment recycling; combined infrastructure; logistics; environmental impact; production capacities.

Бібліографічні описи / Bibliographic descriptions

Кікоть М. С., Малієєва Ю. А. Моделі формування логістичної інфраструктури ресайклінгу складної техніки. *Сучасний стан наукових досліджень та технологій в промисловості*. 2024. № 3 (29). С. 15–28. DOI: <https://doi.org/10.30837/2522-9818.2024.3.015>

Kikot, M., Malieieva, Y. (2024) "Models of forming logistics infrastructure for complex equipment recycling", *Innovative Technologies and Scientific Solutions for Industries*, No. 3 (29), P. 15–28. DOI: <https://doi.org/10.30837/2522-9818.2024.3.015>