

УДК 658.012.23

DOI: <https://doi.org/10.30837/2522-9818.2025.3.019>

М. Кікоть, Ю. Малєєва

МОДЕЛЬ ЛОГІСТИЧНОЇ ІНФРАСТРУКТУРИ ДВОХЕТАПНОГО ПРОЦЕСУ РЕСАЙКЛІНГУ СКЛАДНОЇ ТЕХНІКИ

Предмет дослідження – моделі формування логістичної інфраструктури ресайклінгу складної техніки з огляду на двохетапний процес перероблення та багатокомпонентного складу вторинної сировини. **Метою роботи** є створення моделі формування логістичної інфраструктури підприємств ресайклінгу складної техніки, упровадження якої дасть змогу зменшити витрати на транспортування вторинної сировини та розбудову інфраструктури. **Завдання:** дослідити сучасний стан і проблематику сфери перероблення компонентів складної техніки в Україні та за кордоном; визначити особливості логістичних процесів ресайклінгу складної техніки; розробити модель формування логістичної інфраструктури ресайклінгу складної техніки. **Методи:** математичне моделювання, методи розміщення-розподілу, системний підхід. **Результати:** проаналізовано сучасний стан і проблематику перероблення компонентів складної техніки, зокрема недосконалість інфраструктури, низький рівень сортування та нерівномірність розміщення підприємств; проаналізовано підходи до виконання завдання розміщення об'єктів інфраструктури ресайклінгу; побудовано дворівневу структуру системи ресайклінгу складної техніки, що містить мережу локальних пунктів збирання та сортування та переробних підприємств; запропоновано модель формування логістичної інфраструктури, у якій узято до уваги виробничі потужності, транспортні витрати та багатокомпонентність ресурсів. **Висновки.** Запропоновано модель формування логістичної інфраструктури ресайклінгу складної техніки, у якій узято до уваги двохетапний характер перероблення складної техніки – від збирання та сортування до кінцевого перероблення компонентів, а також транспортування декількох видів ресурсу. Модель поєднує економічні, просторові та технологічні аспекти, що дає змогу мінімізувати загальні витрати на транспортування вторинної сировини та розбудову інфраструктури ресайклінгу. Використання моделі забезпечує ефективне планування мережі підприємств ресайклінгу з огляду на виробничі потужності, логістичні маршрути та обсяги різних типів вторинної сировини.

Ключові слова: ресайклінг; перероблення вторинної сировини; складна техніка; оптимізаційна модель; інфраструктура; логістика; двохетапна система.

Вступ

Через війну Україна зіштовхнулася з безпрецедентними руйнуваннями житлових, громадських приміщень, різних інфраструктурних споруд, транспортних об'єктів, а отже, і з величезними обсягами великогабаритних відходів. Влада громад, населених пунктів, особливо тих, що постраждали від окупації, не має стратегії щодо зберігання та утилізації відходів. Через відсутність достатньої кількості складів, сортувальних ліній та ефективних механізмів поводження з відходами в країні зростає кількість нелегальних сміттєзвалищ, що загрожує довкіллю та здоров'ю населення. Наявні потужності недовантажені й не охоплюють навіть базовий рівень побутових відходів, що унеможливує ефективне оброблення більш складних фракцій [1].

Варто зазначити, що проблема поводження з відходами в країні існувала і до повномасштабного вторгнення: переповерхні звалища та полігони, слабка культура сортування й перероблення відходів.

Дослідження питання перероблення будівельних відходів і відходів руйнації розглянуто в праці [2]. У цій статті приділяється увага насамперед проблемам перероблення та повторного використання компонентів складної техніки (СТ).

До компонентів СТ належать: метал, пластик, скло, мікросхеми, кабелі та провідники, рідини й мастила, поліетилен, акумулятори тощо [3].

Необхідно виокремити кілька напрямів ресайклінгу складної техніки.

1. Знищення та поховання техніки. Напрямок визначається значним негативним впливом на довкілля. Особливістю також 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.

Важливим питанням, що впливає на економічний складник процесу ресайклінгу, є розміщення об'єктів інфраструктури ресайклінгу, сучасні підходи до розв'язання якої розглянемо в наступному розділі.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Для оптимального розміщення об'єктів ресайклінгу і підвищення логістичної ефективності дослідники зосереджують увагу на розробленні математичних моделей та алгоритмів. Розв'язання задач розташування підприємств, складів та інших інфраструктурних підприємств є складним багатоаспектним процесом – необхідно брати до уваги географічні умови, особливості земельного фонду, логістичну доступність, економічну ефективність, екологічні обмеження та соціальні критерії. У широкому контексті такі задачі розміщення належать до оптимізаційних, що описують логістичні мережі та транспортні системи. Для формалізації використовують як дискретні моделі, так і неперервні.

Задачі розміщення об'єктів широко застосовуються в різних сферах логістики: вибір місця для центрів обслуговування або дистрибуційних центрів; розташування сервісних пунктів у межах регіону. У багатьох дослідженнях розглядалися "центричні" моделі розміщення, які гарантують покриття попиту, на зразок задач розміщення лікарень чи пожежних станцій [4]. Подібні підходи застосовують також у плануванні розроблення територій, зрошувальних систем чи розташування базових станцій мобільного зв'язку.

Через значну кількість факторів для вибору локації часто застосовують методи багатокритеріальної оптимізації або експертне оцінювання. Це дає змогу додавати до моделі якісні чинники поряд із кількісними [5]. Проте залученість експертів привносить суб'єктивність і заздалегідь обмежує простір пошуку можливих місць. Відомо, що такий підхід спрощує задачу, але може знижувати об'єктивність результатів.

У нелінійних моделях використовують метод множників Лагранжа, щоб брати до уваги обмеження завантаженості виробничих ліній та мінімально необхідний обсяг переробки для досягнення економічної ефективності. Застосування p -медіани дає змогу мінімізувати середню відстань між джерелами відходів та пунктами їх збирання. У разі нерівномірного просторового розподілу споживачів

та складної геометрії території застосовують адаптовані алгоритми для неперервної p -медіани, які демонструють значне зниження транспортних витрат за великих обсягів інформації та заданих просторових обмежень. У статті [6] описано підхід до розв'язання задачі розміщення об'єктів на неперервному просторі способом знаходження p -оптимальних центрів (медіан), які мінімізують сумарну відстань до точок попиту. Запропонований авторами еволюційний алгоритм демонструє високу ефективність за умов значного обсягу інформації та складної геометрії простору. Метод неперервної p -медіани є особливо корисним для задач, де попит або джерела відходів розподілені нерівномірно або без чіткої дискретизації, що робить його придатним для моделювання систем логістики у сфері ресайклінгу. Результати дослідження продемонстрували, що метод дає змогу досягти суттєвого зменшення транспортних витрат і є гнучким до адаптації під особливі просторові обмеження.

Нині існує низка алгоритмів і методів, призначених для розв'язання багатовимірних і складних задач розміщення. Зокрема методи на основі генетичних алгоритмів і евристичних підходів активно використовуються завдяки їх здатності швидко знаходити ефективні рішення без потреби в складних теоретичних обґрунтуваннях. К. Хак, Дж. Джойнс та М. Кей [7] порівнюють генетичні алгоритми з іншими евристичними методами в процесі розв'язання масштабних задач розміщення та розподілу ресурсів. У дослідженні [8] запропоновано вдосконалений цей самий алгоритм із застосуванням теорії сірих систем для розв'язання задачі оптимального розміщення об'єктів охорони здоров'я в умовах невизначеності.

Серед українських дослідників можна згадати праці Л. Коряшкіної та Д. Лубенця [9] – алгоритми територіальної сегментації, що формують неперервні задачі оптимального мультиплексного розбиття множин з обмеженнями, формалізацією яких є математична модель задачі розміщення сервісних центрів і територіального зонування ресурсів. О. Кісельова, С. Ус і О. Притоманова [10] запропонували двохетапну математичну модель оптимального розбиття та розподілу ресурсів у системах, що мають поєднану неперервну й дискретну структуру, яка може бути адаптована для задач розміщення в логістиці, разом з екологічними системами.

У контексті прикладних моделей для ресайклінгу важливими є дослідження О. Станіної, яка запропонувала

методи двохетапного розміщення виробництва з неперервно розподіленим ресурсом [11]. Історично важливими для теорії залишаються роботи, що сформували основу класичних моделей розміщення. Також варто віддати належне українським ученим, які досліджують розміщення об'єктів у логістичних і регіональних системах.

З огляду на багатофакторний характер задачі та наявність обмежень у науковій літературі запропоновано низку підходів до її розв'язання. Серед актуальних методів було обрано п'ять, що демонструють ефективність у задачах оптимального розміщення складів у межах логістичних мереж ресайклінгу складної техніки.

У праці [12] запропоновано гібридний симевристичний підхід для розв'язання задачі розміщення підприємств в умовах невизначеності. Поєднання *Tabu Search* (методу для поступового покращення рішень із запам'ятовуванням попередніх кроків, щоб не повертатися до вже перевірених варіантів) і *Path Relinking* (стратегії, що дає змогу знаходити ще кращі рішення способом поєднання двох успішних) дає змогу ефективно знаходити

рішення, що мінімізують загальні витрати з огляду на можливі коливання попиту та витрат на обслуговування.

Дослідження [13] демонструє використання імітаційного моделювання для розв'язання задачі розміщення складів у ланцюгах постачання. Застосовано програмні засоби FLEXSIM та SIMMAG3D для моделювання різних сценаріїв розміщення, що допомагає оцінити вплив розташування на ефективність логістичної системи.

Крім того, щоб зважати на такі чинники, як рельєф, стан земель, наявність забудови, доступність транспорту тощо, нерідко звертаються до GIS-аналізу. У роботі [14] розроблено математичні моделі та методи зонування й розміщення об'єктів у системах екстреної логістики з використанням геоінформаційних систем (ГІС). Зокрема застосовано діаграми Вороного для визначення зон обслуговування та оптимального розміщення центрів реагування в умовах надзвичайних ситуацій.

Нижче в таблиці наведено порівняльну характеристику методів, описано їх інструменти, ключові властивості, переваги й обмеження (табл. 1).

Таблиця 1. Підходи до розв'язання задачі розміщення складів

№	Назва підходу	Основні інструменти / методи	Ключові властивості	Переваги	Обмеження
1	Гібридний симевристичний підхід	Tabu Search, Path Relinking	Оптимізація мережі в умовах невизначеності та змінного попиту	Дає квазіоптимальні рішення за великої розмірності; адаптивний до змін	Потребує налаштування параметрів; високі обчислювальні витрати
2	Імітаційне моделювання логістики	FLEXSIM, SIMMAG3D	Моделювання функціонування мережі складів за різних сценаріїв	Дає змогу оцінити наслідки змін у структурі логістичної мережі	Потребує наявності достовірної інформації; складність валідації
3	ГІС з діаграмами Вороного	ArcGIS, QGIS, Python	Просторове зонування та аналіз доступності для оптимізації покриття територій	Візуалізація та інтеграція реальних картографічних показників	Не бере до уваги потужність об'єктів; обмежена точність у щільній міській забудові
4	Математичне моделювання (нелінійна оптимізація, теорія двоїстості)	Метод множників Лагранжа	Розв'язання задачі з обмеженнями за потужністю складів і транспортом	Зважає на реальні виробничі обмеження; точність	Складність формулювання та інтерпретації для значної кількості об'єктів
5	Геометрична оптимізація, інтегральні методи	Метод неперервної p -медіани	Оптимізація розміщення об'єктів у просторі з неперервним розподілом відходів	Зменшує середні витрати на транспортування; бере до уваги розсіяну географію	Вимагає інтегральних розрахунків; не підходить для малих територій

Для вибору оптимальних місць розташування складів і виробничих майданчиків ресайклінгу зазвичай застосовують комплексні оптимізаційні моделі, що беруть до уваги транспортні витрати, виробничі потужності, географічні особливості та соціально-економічні обмеження. Проте через складність реальних логістичних систем одних лише математичних методів недостатньо. Тому все більшої ваги набуває імітаційне моделювання як ефективне доповнення до оптимізаційних підходів, що дає змогу гнучко аналізувати різні сценарії, зважати на динаміку змін середовища й адаптувати рішення у взаємодії з децидентом [15].

Постановка завдання дослідження

Аналіз сучасних досліджень свідчить, що більшість робіт зосереджено на базових моделях розміщення, які розширюються внаслідок долучення додаткових умов, таких як обмеження на обсяги виробництва, кількість видів продукції, багатокритеріальність тощо.

Проте значна частина досліджень обмежується одноетапними задачами або розглядає транспортування одного виду ресурсу, що не відповідає складності реальних систем ресайклінгу, де необхідно брати до уваги багатоступеневі процеси та різноманітність видів відходів. Отже, моделі, що зважають на багатопродуктивність і багатоетапність, залишаються недостатньо розробленими.

Зазначимо, що існує обмежена кількість досліджень, присвячених оптимальному розміщенню сміттесортувальних підприємств у контексті інтегрованих систем управління відходами. Більшість таких робіт присвячено перерозподілу твердих побутових відходів, незважаючи на багатоконпонентність процесу ресайклінгу СТ та особливості інфраструктури.

Мета дослідження – створення моделі формування логістичної інфраструктури підприємств ресайклінгу СТ, упровадження якої дасть змогу зменшити витрати на транспортування вторинної сировини та розбудову інфраструктури ресайклінгу СТ.

Для здійснення окресленої мети необхідно виконати такі завдання:

- 1) проаналізувати сучасний стан сфери перероблення компонентів складної техніки;
- 2) визначити особливості логістичних процесів ресайклінгу складної техніки;

3) розробити модель формування логістичної інфраструктури ресайклінгу СТ.

Зі свого боку створення оптимізаційної моделі потребує розв'язання таких питань:

- визначення типу оптимізаційної задачі;
- формування цільової функції, що бере до уваги основні види витрат на формування інфраструктури;
- формулювання обмежень оптимізаційної задачі.

Сучасний стан сфери перероблення компонентів складної техніки

Проаналізуємо сучасний стан сфери перероблення вторинної сировини в Україні та за кордоном.

До повномасштабної війни Україна мала низький рівень перероблення відходів на тлі домінування захоронення: перероблялося лише близько 5–7% побутових відходів, а решта потрапляла на численні легальні й нелегальні сміттєзвалища. Це призводило до дефіциту якісної вторинної сировини, оскільки система роздільного збирання відходів фактично була відсутня. Унаслідок цього вітчизняні підприємства вимушено імпортували макулатуру, полімерні матеріали та склобій для забезпечення своїх потреб у сировині [16].

Станом на 2020 р. в Україні працювало 17 підприємств із перероблення макулатури, 39 – полімерів, 19 – ПЕТФ-сировини, 16 – склобою (рис. 1). Щорічно на переробні підприємства України потрапляє 160 тис. т полімерів, 50 тис. т ПЕТ-пляшок. Проте потужність підприємств із перероблення полімерів та ПЕТ-пляшок, наприклад, завантажена тільки на 65%. У 28 населених пунктах працюють 34 сортувальні лінії, у 17 населених пунктах упроваджуються сортувальні комплекси. У 1462 населених пунктах впроваджується роздільне збирання побутових відходів [17]. Серед підприємств є один сміттєспалювальний – київський завод "Енергія", що спалює близько 25 % загальної кількості сміття столиці, житомирський сміттєпереробний завод, відкритий 2023 р. з потужністю перероблення 85000 т на рік, та ще один у Львові, який планують запустити 2025 р. з потужністю 250000 т на рік. Також міністерство захисту довкілля та природних ресурсів сформувало план розміщення нових заводів, який передбачає 207 проєктів, що мають з'явитися по всій країні до 2034 р.

У Європі працює понад 500 сміттєспалювальних заводів, але країни ЄС поступово відмовляються

від спалювання через екологічні ризики, високу вартість та інші фактори. Спалювання – один із найдорожчих способів виробництва енергії – не знищує відходи повністю, а лише зменшує їх об'єм і підвищує токсичність, створюючи небезпечні побічні продукти, що потребують захоронення.



Рис. 1. Інфраструктура перероблення вторинної сировини в Україні станом на 2020 р.

Серед європейських країн, де розвинена інфраструктура ресайклінгу, однією з найбільш чистих є Швеція, яка за офіційною інформацією переробляє майже 100% твердих побутових відходів (ТПВ). Проте ці показники суперечать дійсності, оскільки майже 50% шведських відходів спалюється, а це абсолютно інший процес від перероблення, і в Україні діє 32 сміттєспалювальні заводи, де з 2000 р. до 2015 р. спалювали в середньому майже 50% усіх своїх ТПВ. Щодо перероблення, 2015 р. Швеція переробила 32% від загального обсягу ТПВ (48% разом з органічними відходами), хоча це і дуже далеко від загальної мети Європейської комісії щодо перероблення ТПВ у 65% до 2030 р.

2020 р. Швеція запровадила податок 75 крон за тону спалених відходів, зокрема імпортований RDF із Великобританії. Метою є скорочення спалювання для досягнення кліматичних цілей і ефективнішого управління відходами [18].

Станом на 2017 р. в Італії функціонувало 285 підприємств із компостування, які обробляли близько 3,3 млн т твердих побутових відходів. У Литві з 2011 р. зафіксовано суттєве зростання обсягів компостування – з приблизно 2,5% до понад 20%. Водночас Ірландія демонструє стратегічний підхід до управління окремими потоками відходів, встановивши мету: до 2030 р. забезпечити перероблення або компостування 70% усіх пакувальних матеріалів [19].

В Іспанії діє 137 сміттєпереробних підприємств, які щороку обробляють близько 13 млн т відходів. Вони поділяються на шість категорій: чотири

працюють із змішаними побутовими відходами (сортування, компостування, біосушіння, біометанізація), а дві – з роздільно зібраними біовідходами. Із змішаних відходів вдається вилучити близько 5% вторинної сировини (переважно пластик, метали, папір), а решта йде на виробництво біогазу або у відходи [20].

Відповідно до статистичних показників [21], серед заводів, що фізично переробляють відходи (зокрема пластикові, електронні, металеві тощо) на нові матеріали, лідирує Німеччина з кількістю 1840 од., а 10-те місце посідає Бельгія з 250 од. (рис. 2).

#	10 країн	Одиниці (Підприємства)	Минулого року	YoY	5-річний CAGR
1	Німеччина	1840	2023 рік	+4,54%	+1,53%
2	Велика Британія	1290	2023 рік	+1,74%	+1,75%
3	Словаччина	1100	2023 рік	+10,18%	+13,08%
4	Італія	1090	2023 рік	+1,87%	+4,33%
5	Франція	773	2023 рік	+0,26%	+3,95%
6	Іспанія	564	2023 рік	+1,62%	+3,32%
7	Польща	449	2023 рік	+1,13%	+0,77%
8	Австрія	312	2023 рік	0%	+0,19%
9	Чехія	305	2023 рік	-2,24%	-2,26%
10	Бельгія	250	2023 рік	+0,81%	+4,56%

Рис. 2. Кількість підприємств із перероблення в країнах ЄС

Після проведення аналізу було взято до уваги приклади інфраструктури розвинених у сфері ресайклінгу країн. Порівнявши їх зі статистичними показниками України, можна прийти до висновку, що в країні необхідно розробити оптимізаційні рішення для створення системи ефективного перероблення СТ.

Особливості логістичних процесів ресайклінгу складної техніки

Загалом процес ресайклінгу СТ є багатоетапним.

На першому етапі організовують збирання та сортування відпрацьованої СТ, визначають основні джерела утворення відходів, серед яких промислові підприємства, комунальні служби, торговельні мережі, будівельні компанії та приватні домогосподарства. Аналіз обсягів, складу й періодичності утворення відходів дає змогу сформувати стратегію оптимального розташування пунктів збирання. Вони розміщуються з огляду на територіальну щільність відходів, транспортну доступність, можливість розширення під'їзних шляхів до сортувальних центрів.

Після збирання відходи піддаються первинному сортуванню, під час якого відокремлюють різні матеріали, такі як пластик, метал, скло, органічні відходи та електроніка. Додатково матеріали пресують та ущільнюють для оптимізації транспортування, подрібнення великих об'єктів, а також вилучення небезпечних компонентів, що не підлягають подальшому обробленню.

Другий етап ресайклінгу СТ охоплює транспортування відсортованих відходів із пунктів збирання до переробних підприємств, безпосередньо технологічні процеси перероблення, а також подальший розподіл отриманої вторинної сировини між кінцевими споживачами.

На початку цього етапу необхідно забезпечити організацію транспортних процесів між пунктами збирання та сортування до переробних центрів. Оптимізація маршрутів транспортування ґрунтується на тому, щоб брати до уваги територіальне розташування об'єктів, обсяги відходів, які підлягають перевезенню, та пропускну спроможність кожного підприємства.

Після цього переробляють відходи, що надходять на підприємства. Важливим аспектом є

контроль за відповідністю обсягів відходів потужностям підприємств, що реалізується за допомогою математичних моделей балансування потоків сировини.

Після перероблення отримана вторинна сировина або енергетичні ресурси розподіляються між кінцевими споживачами. Цей процес передбачає аналіз попиту на перероблені матеріали, оптимізацію мережі постачань і вибір найефективніших транспортних засобів для їх доправлення. Оскільки місця споживання можуть бути територіально розподіленими, важливим є вибір місць розташування стратегічних центрів зберігання та перевантаження.

Отже, узагальнений процес ресайклінгу СТ містить два етапи, і, відповідно, структура системи передбачає два рівні (рис. 3):

1 рівень – локальні підприємства зі збирання й сортування (ЛПЗС), що займаються первинним обробленням відходів: збиранням, сортуванням і підготовкою до подальшого перероблення;

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

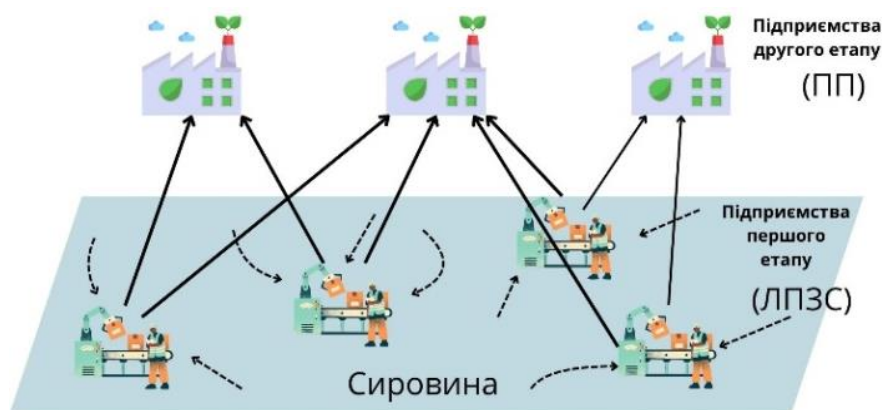


Рис. 3. Схема двохетапного процесу ресайклінгу СТ

Отже, у системах, що поєднують логістичні й виробничі процеси, ключовими компонентами є два типи підприємств: перші (підприємства першого рівня) призначені для збирання просторово розосереджених матеріальних ресурсів, другі (підприємства другого рівня) – для подальшого використання або перероблення ресурсів. Зазвичай підприємства, що здійснюють первинний збір, обслуговують закріплену за ними територію. Рух матеріальних потоків у межах такої системи відбувається поетапно: спочатку – від джерел

виникнення ресурсу до пунктів збирання, а далі – від попередньо оброблених чи відсортованих матеріалів до спеціалізованих заводів, що забезпечують кінцеве оброблення або споживання. У контексті мережі підприємств, що управляють відходами, ресурсом є відходи у вигляді СТ, непридатної до використання та з вичерпаним ресурсом [22].

Зазначимо, що витрати в системі ресайклінгу та перероблення вторинної сировини тісно пов'язані з виконанням завдання розташування та визначення оптимальної кількості ЛПЗС та ПП. Зі збільшенням

кількості перших зростають витрати на транспортування відходів до других, однак водночас скорочуються витрати на збирання відходів у населених пунктах, що може загалом зменшити витрати на логістику. Крім того, підвищується зручність для населення та інших джерел відпрацьованої СТ, оскільки пункти збирання стають більш доступними. Водночас зростає загальний обсяг проміжних запасів відходів у системі, хоча обсяг, що накопичується на кожному окремому ЛПЗС, зменшується. Експлуатаційні витрати на одне локальне підприємство можуть бути нижчими, однак загальні витрати на утримання мережі таких об'єктів і їх управління зростають, хоча темпи цього зростання поступово сповільнюються. Водночас скорочення кількості ЛПЗС збільшує відстань між джерелами утворення відходів і місцями збирання, що може ускладнити охоплення територій, доступність для населення та знизити ефективність системи перероблення. Тому для мінімізації витрат важливо не лише оптимізувати кількість підприємств обох етапів, а й правильно обрати їх розташування, зважаючи на відстань до населених пунктів, обсяг вантажообігу та наявну транспортну інфраструктуру.

Отже, для розв'язання завдання розміщення підприємств першого й другого етапів ресайклінгу з метою мінімізації витрат, що передбачають витрати на розбудову нових заводів і витрати на транспортування відходів між ПП та ЛПЗС, необхідно сформулювати математичну постановку двохетапної задачі оптимального розподілення ресурсу, що має брати до уваги декілька видів ресурсу (вантажу).

Модель формування логістичної інфраструктури ресайклінгу складної техніки

У процесі формування логістичної інфраструктури ресайклінгу компонентів СТ можливі декілька стратегій:

- 1) використання мережі наявних підприємств, якщо їх потужності покривають потреби перероблення;
- 2) розбудова мережі наявних заводів із долученням нових, щоб задовольнити потреби перероблення.

У цьому разі постає питання досягнення компромісу між транспортними витратами та витратами на будівництво й експлуатацію цих підприємств.

Одним із ключових підходів до моделювання та оптимізації розміщення логістичних об'єктів є задачі оптимального розбиття множин (ОРМ). Ці задачі

передбачають поділ простору на підмножини таким чином, щоб мінімізувати визначений цільовий функціонал, наприклад, витрати на транспортування, оброблення або утилізацію ресурсів.

Загалом **задача розміщення-розподілу** полягає у визначенні кількості нових об'єктів, їх просторового розташування та оптимального розподілу потоків між новими й наявними пунктами з огляду на мінімізацію загальних витрат на транспортування до кінцевих споживачів.

Зважаючи на вказану особливість ресайклінгу СТ, це дослідження присвячено формулюванню двохетапної виробничо-транспортної задачі, яка є окремим випадком задачі розміщення-розподілу. Така постановка відтворює послідовний процес збирання, первинного сортування та подальшого перероблення відходів, що дає змогу оптимізувати логістичні витрати та підвищити ефективність управління ресурсами.

Постановка узагальненої **двохетапної задачі розміщення-розподілу** може бути задана в такий спосіб. Необхідно обрати розташування заводів першого й другого етапів та визначити маршрути, за якими перевозиться визначена кількість продукту, що постачається від кожного підприємства першого етапу до підприємств другого етапу і від підприємств другого етапу споживачам таким чином, щоб сумарні витрати на доправлення продукції були мінімальні.

Для ефективної реалізації двохетапної виробничо-транспортної моделі необхідно застосувати оптимізаційні методи, що дають змогу мінімізувати логістичні витрати, оптимізувати розміщення пунктів збирання та перероблення, а також забезпечити баланс між обсягами зібраних і перероблених відходів.

Зважаючи на мережну структуру системи підприємств ресайклінгу, запропонуємо позначки, що дадуть змогу розглянути її складники [3]:

l – порядковий номер виду відходу, $l = 1 \dots L$;

L – кількість видів відходів, що підлягають збиранню, сортуванню та переробленню;

i – порядковий номер пункту відправлення (ПВ) відходів, $i = 1 \dots I$;

I – кількість пунктів відправлення відходів;

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

J – кількість локальних пунктів ЛПЗС;

k – порядковий номер ПП, $k = 1 \dots K$;

K – кількість підприємств з перероблення.

Подамо інфраструктуру ресайклінгу СТ, запропоновану на рис. 1, у формалізованому вигляді

(рис. 4). Позначки на рис. 4 відповідають тим, що наведені вище.

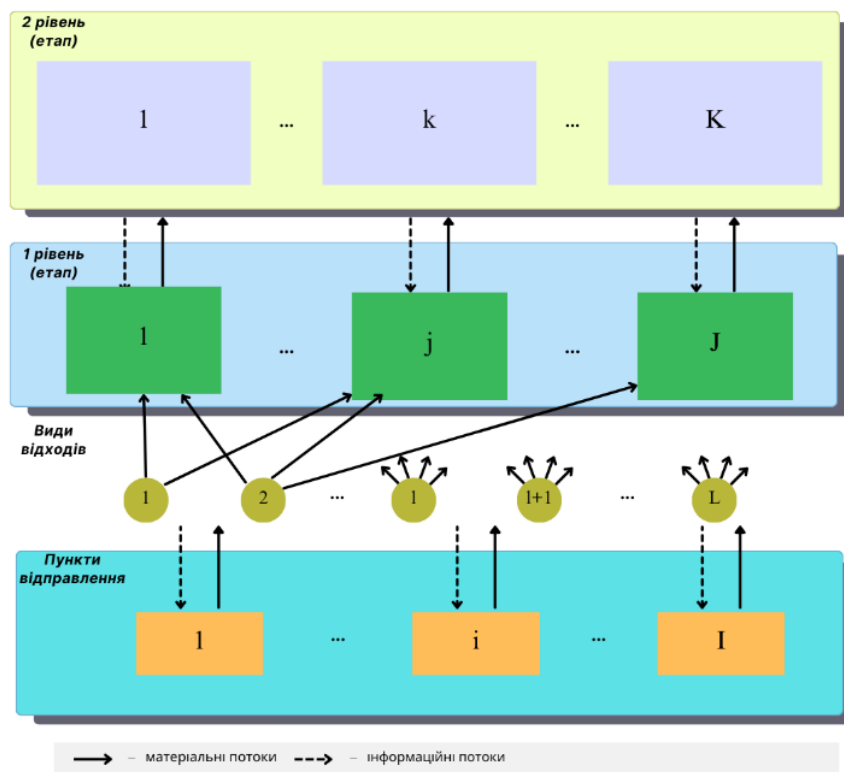


Рис. 4. Інфраструктура ресайклінгу СТ

Зауважимо, що транспортування відходів із пунктів відправлення до ЛПЗС може здійснюватись за допомогою джерел, що утворюють відходи, тому необхідність брати до уваги витрати на це транспортування має вирішуватись у кожному разі окремо. Якщо основними постачальниками відпрацьованої техніки є великі компанії та процес відбувається на регулярній основі, тоді зважати на витрати на транспортування необхідно обов'язково. У роботі розглянуто загальний випадок з огляду на витрати на транспортування СТ з пунктів відправлення до ЛПЗС.

Крім того, здебільшого за умови існування достатньої кількості підприємств другого етапу (ПП), задача полягатиме в пошуку місць розташування підприємств ЛПЗС. До ПП належать спеціалізовані заводи з перероблення металу, пластику, скла тощо, у яких відбуваються складні технологічні процеси, а отже, є потреба в дорогому обладнанні. Тому важливо розглядати сучасні переробні підприємства та розв'язувати завдання розміщення ЛПЗС з огляду на наявне розміщення ПП. Зазначимо, що додатковим обмеженням є те, що не береться

до уваги попит кінцевого споживача продукції переробних підприємств.

Відповідно, основні фактори в моделі формування логістичної інфраструктури ресайклінгу СТ подамо таким чином:

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

v_{lij} – об'єм відходів l -го виду, що транспортується з i -го пункту відправлення до j -го ЛПЗС;

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

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

d_{ij} – відстань від i -го пункту відправлення до j -го ЛПЗС;

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

c_{lj} – витрати на збирання та сортування одиниці об'єму відходів l -го виду в j -му ЛПЗС;

c_{lij} – питомі витрати (на 1 км) транспортування одиниці об'єму l -го виду відходів з i -го пункту відправлення до j -го ЛПЗС;

c_{ijk} – питомі витрати на 1 км транспортування одиниці об'єму l -го виду відходів з j -го ЛПЗС до k -го ПП;

c_{lk} – витрати на перероблення одиниці об'єму відходів l -го виду на k -му ПП.

1. Розглянемо спочатку транспортні витрати на перевезення відходів.

Сумарні витрати на транспортування з пунктів відправлення до ЛПЗС:

$$C_{tr}^{ЛПЗС} = \sum_{l=1}^L \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J c_{lij} d_{ij} v_{lij} x_{ij},$$

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

$$x_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{якщо наявний маршрут перевезень} \\ & \text{від } i\text{-го пункту відправлення до } j\text{-го ЛПЗС,} \\ 0, & \text{якщо маршрут відсутній.} \end{cases}$$

Сумарні витрати на транспортування з ЛПЗС до ПП:

$$C_{tr}^{ЛПЗС-ПП} = \sum_{l=1}^L \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^K c_{ljk} d_{jk} v_{ljk} x_{jk},$$

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

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

Тоді сумарні витрати на перевезення відходів та напівфабрикатів дорівнюють

$$\begin{aligned} C_{tr} &= C_{tr}^{ЛПЗС} + C_{tr}^{ЛПЗС-ПП} = \\ &= \sum_{l=1}^L \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J c_{lij} d_{ij} v_{lij} x_{ij} + \sum_{l=1}^L \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^K c_{ljk} d_{jk} v_{ljk} x_{jk}. \end{aligned}$$

2. Наступним кроком розглянемо витрати, пов'язані з розміщенням підприємств першого та другого рівнів, тобто ЛПЗС та ПП відповідно.

Нехай $M_r = (M_1, M_2)$ – множина можливих пунктів розміщення r -го рівня, $r = 1, 2$;

M_1 – множина можливих місць розміщення підприємств першого рівня (ЛПЗС);

M_2 – множина можливих місць розміщення підприємств другого рівня (ПП);

g_j – витрати на розміщення ЛПЗС у пункті j ;

g_k – витрати на розміщення ПП у пункті k .

Задача розв'язується за умови, що кожне підприємство першого рівня має свою зону обслуговування, ці зони не перетинаються та покривають всю територію.

Потрібно обрати підмножини пунктів розміщення кожного рівня (етапу) $S^r \subset M_r$, $r = 1, 2$ та здійснити призначення обраних підприємств на пункти відправлення вторинної сировини так, щоб мінімізувати сумарні витрати на розміщення всіх обраних підприємств і на транспортування продукту.

Додамо цілочисельні (булеві) змінні y_j , ($j \in M_1$) та y_k ($k \in M_2$), що визначають необхідність розміщення підприємств першого та другого рівнів відповідно:

$$y_j = \begin{cases} 1, & \text{якщо ЛПЗС розміщується в пункті } j, \\ 0, & \text{в іншому разі.} \end{cases}$$

$$y_k = \begin{cases} 1, & \text{якщо ПП розміщується в пункті } k, \\ 0, & \text{в іншому разі.} \end{cases}$$

Витрати на розміщення підприємств першого (ЛПЗС) та другого (ПП) етапів розраховуються таким чином:

$$G = \sum_{j \in M_1} g_j y_j + \sum_{k \in M_2} g_k y_k.$$

Цільовою функцією є мінімізація всіх сумарних витрат, пов'язаних із розміщенням підприємств, виробництвом і транспортуванням сировини (відходів, відпрацьованої СТ) і напівфабрикатів (після сортування та попереднього оброблення) з ЛПЗС до ПП.

Отже, математична модель двохетапної задачі розміщення-розподілу формулюється таким чином: знайти такі значення змінних x_{ij} , x_{jk} , y_j , y_k , що надають мінімального значення цільовій функції

$$\begin{aligned} &\sum_{j \in M_1} g_j y_j + \sum_{k \in M_2} g_k y_k + \\ &+ \sum_{l=1}^L \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J c_{lij} d_{ij} v_{lij} x_{ij} + \sum_{l=1}^L \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^K c_{ljk} d_{jk} v_{ljk} x_{jk} \rightarrow \min, \end{aligned}$$

з огляду на вказані нижче обмеження.

Зазначимо, що в статті проаналізовано задачу розміщення за наявності обмежень на потужність підприємств. Насамперед розглянемо обмеження виробничої потужності підприємств із перероблення.

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

$$\sum_{i=1}^I \sum_{l=1}^L v_{lij} x_{ij} \leq V_{j\max},$$

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

Іншими словами, сумарні запаси ресурсу в зоні обслуговування j -го підприємства першого етапу не мають перевищувати потужності цього підприємства.

2. Наступна умова передбачає, що кількість продукту, який вивозиться з j -го ЛПЗС на k -ті ПП, дорівнює потужності цього ЛПЗС:

$$\sum_{l=1}^L \sum_{k=1}^K v_{ljk} x_{jk} = V_{j \max}.$$

3. Переробні заводи мають обмеження за загальним об'ємом перероблення:

$$\sum_{j=1}^J \sum_{l=1}^L v_{ljk} x_{jk} \leq V_{k \max},$$

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

Ця умова відповідає тому, що кількість продукту, що доправляється до k -го підприємства другого етапу, не має перевищувати виробничу потужність цього підприємства.

Додаємо також обмеження, властиві для задач розміщення.

4. Кожен пункт відправлення має бути під'єднаний до одного ЛПЗС:

$$\sum_{j \in J} x_{ij} = 1, \forall i \in I.$$

5. Пункт відправлення може бути під'єднаний лише до відкритого ЛПЗС:

$$x_{ij} \leq y_j, \forall i \in I, \forall j \in J.$$

6. ЛПЗС може бути під'єднаний лише до відкритого переробного підприємства:

$$x_{jk} \leq y_k, \forall j \in J, \forall k \in K.$$

Умова бінарності змінних:

$$x_{ij}, x_{jk}, y_j, y_k \in \{0, 1\}.$$

Необхідно обрати розташування підприємств першого та другого етапів і визначити маршрути, якими транспортується певна кількість продукту з пунктів відправлення до кожного підприємства першого етапу й від кожного підприємства першого етапу до підприємств другого етапу таким чином, щоб сумарні витрати були мінімальні.

Наразі існують алгоритми й методи для розв'язання такого виду задач з огляду на більшу розмірність і складність, які докладно описано в роботі [11, с. 44–48]. Переважно це методи розв'язання задач дискретної оптимізації, зважаючи на лінійні та нелінійні обмеження. Види обмежень

для розв'язання задачі в конкретних умовах впливатимуть на можливість і вибір методу розв'язання.

Результати досліджень та їх обговорення

Задачі розміщення-розподілу вирізняються високою складністю як на етапі формалізації, так і під час практичного впровадження запропонованих рішень. Моделювання таких задач потребує участі досвідчених аналітиків, оскільки зміна місця розташування об'єкта після реалізації проекту є надзвичайно затратною та практично незворотною процедурою. Вартість помилки на етапі проектування системи може суттєво вплинути на ефективність її подальшого функціонування, особливо в умовах нестабільного середовища або обмежених ресурсів.

Математичні моделі, у яких взято до уваги етапи перероблення та просторовий розподіл сировини, дають змогу суттєво знизити витрати на транспортування в межах комплексних логістичних систем. Це особливо важливо для організації виробничо-переробних ланцюгів, де джерела ресурсів розміщені нерівномірно, як, наприклад, у процесі збирання великогабаритних відходів після руйнації інфраструктури. Оптимізація переміщення матеріальних потоків на кожному етапі системи забезпечує зниження як витрат, так і часових затримок у логістиці.

Для побудови ефективного математичного забезпечення задач цього типу використовуються положення теорії неперервних задач оптимального розбиття множин, методи розміщення центрів підмножин, концепції двоїстості та підходи, основані на класичних алгоритмах лінійного програмування транспортного типу.

Варто зазначити, що в разі, коли ресурс має непередбачуваний характер розподілу, а також коли кількість джерел постачання надмірно велика й можуть виникнути проблеми зростання обчислювальної складності, необхідно застосовувати методи імітаційного моделювання.

Висновки

У сучасних умовах глобалізації зростає потреба в оптимізації логістичних процесів у сфері поводження з відходами, зокрема в системах ресайклінгу. Рациональне розміщення інфраструктурних об'єктів, пов'язаних зі збиранням, обробленням і переробленням відходів, є складною багатокритеріальною задачею,

що вимагає брати до уваги економічні, просторово-географічні, соціальні та інші фактори. Ефективне територіальне планування такої мережі сприяє зниженню логістичних витрат, підвищенню ефективності обслуговування територій та зменшенню негативного впливу на довкілля.

У статті проаналізовано сучасні підходи до задачі розміщення об'єктів інфраструктури ресайклінгу, зокрема математичних моделей p -медіани, центричних моделей, методів розбиття множин, а також імітаційного моделювання та GIS-аналізу. Виокремлено п'ять ефективних методів і наведено їх порівняльну характеристику. На основі аналізу методів встановлено, що більшість наявних підходів зосереджені на одноетапні задачі ресайклінгу й не зважають на багатокомпонентність відходів.

Проаналізовано проблеми організації логістичної інфраструктури ресайклінгу СТ. Порівняно приклади інфраструктури розвинених країн і України у сфері ресайклінгу та визначено, що в нашій країні необхідно розробити оптимізаційні рішення для покращення системи ефективного перероблення СТ.

Описано структуру двохетапної системи перероблення відходів СТ, що містить локальні пункти збирання й сортування на першому рівні та підприємства з перероблення на другому. Було зазначено, що важливим є знаходження балансу між кількістю перших і других. Надмірна концентрація

ЛПЗС покращує контроль і зручність для постачальників відпрацьованої СТ, але ускладнює логістику. Водночас їх нестача призводить до зниження доступності та охоплення джерел відходів.

Сформовано математичну модель двохетапної задачі розміщення-розподілу, що бере до уваги виробничі обмеження, транспортування декількох видів ресурсу та логістичні витрати.

Отже, **наукову новизну** дослідження становить модель формування логістичної інфраструктури ресайклінгу СТ, яка зважає на двохетапний характер перероблення компонентів СТ та транспортування декількох видів ресурсу, впровадження якої дасть змогу зменшити витрати на транспортування вторинної сировини та розбудову інфраструктури ресайклінгу СТ унаслідок оптимізації мережі підприємств.

Актуальними завданнями, що можуть бути виконані в подальших дослідженнях, є: розроблення методів моделювання, які зважають на невизначеність та ризики (нестабільність об'єму та складу вторинної сировини, законодавчі зміни, технологічні інновації); взяття до уваги динамічної зміни потоків відходів у часі; інтеграція ГІС-технологій для точного визначення просторових особливостей територій; створення інтегрованих моделей, що дають змогу оптимізувати одночасне розміщення кількох взаємопов'язаних типів інфраструктури.

Список літератури

1. Lytvynenko O., Pavlov K., Mykhailova L. Waste management in Ukraine: organizational aspects. *E3S Web of Conferences*, Vol. 280, No. 11004. 2021. DOI: 10.1051/e3sconf/202128011004
2. Шишкін Е., Гайко Ю., Черноусова Т. Шляхи рециклінгу будівельного сміття під час післявоєнної відбудови зруйнованих міст. *Містобудування та територіальне планування*. 2024. Т. 85. С. 679–697. DOI: <https://doi.org/10.32347/2076-815x.2024.85.679-697>
3. Кікоть М., Малєєва Ю. Моделі формування логістичної інфраструктури ресайклінгу складної техніки. *Сучасний стан наукових досліджень та технологій в промисловості*. 2024. Т. 3, № 29. С. 15–28. DOI: <https://doi.org/10.30837/2522-9818.2024.3.015>
4. Wang H., Luo P., Wu Y. Research on the location decision-making method of emergency medical facilities based on WSR. *Sci Rep*. 2023. Vol. 13, No. 18011. DOI: 10.1038/s41598-023-44209-0
5. Dissanayake I., Gunathilake M. A comprehensive survey of recent advances in facility location problems: Models, solution methods, and applications. *Journal of Sustainable Development of Transport and Logistics*. 2024. Vol. 9, No. 2. P. 78–90. DOI: 10.14254/jsdtl.2024.9-2.6
6. Kazakovtsev L., Rozhnov I., Shkaberina G. Self-Configuring (1 + 1)-Evolutionary Algorithm for the Continuous p -Median Problem with Agglomerative Mutation. *Algorithms*. 2021. Vol. 14, No. 130. DOI: 10.3390/a14050130
7. Christopher R. Houck, Jeffrey A. Joines, Michael G. Kay. Comparison of Genetic Algorithms, Random Restart, and Two-Opt Switching for Solving Large Location-Allocation Problems. *Computers & Operations Research*. 1996. Vol. 22, No 6. P. 587–596

8. Zhang Y., Li J., Zhu Y., Xu H. An Improved Genetic Algorithm for Location Allocation Problem with Grey Theory in Public Health Emergencies. *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 2022. Vol. 19, No. 15(9752). DOI: 10.3390/ijerph19159752
9. Коряшкіна Л., Лубенець Д. Математичні моделі та методи мультиплексного розбиття і багатократного покриття множин для задач розміщення-розподілу. *Information Technology: Computer Science, Software Engineering and Cyber Security*. 2023. Т. 4. С. 20–31. DOI: <https://doi.org/10.32782/IT/2023-4-3>
10. Kiseleva A. I., Prytomanova O. M., Us S. A. Solving a Two-Stage Continuous-Discrete Problem of Optimal Partition–Allocation with a Given Position of the Centers of Subsets. *Cybern Syst Anal*. 2020. Vol. 56. P. 1–12. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10559-020-00215-y>
11. Станіна О. Д. Моделі та методи розміщення двоетапного виробництва з неперервно розподіленим ресурсом: дис. канд. техн. наук.: 01.05.02. Харків, 2019. 188 с.
12. Peidro, D., Martin, X.A., Panadero, J. Solving the uncapacitated facility location problem under uncertainty: a hybrid tabu search with path-relinking simheuristic approach. *Appl Intell*. 2024. Vol. 54. P. 5617-5638. DOI: 10.1007/s10489-024-05441-x
13. Szczepanski E., Jachimowski R., Izdebski M., Jacyna-Golda I. Warehouse location problem in supply chain designing: a simulation analysis. *Archives of Transport*. 2019. Vol. 50, no. 2. P. 101-110. DOI: 10.5604/01.3001.0013.5752
14. Коряшкіна Л. С., Дзюба С. В. Математичні моделі та методи зонування і розміщення об'єктів в системах екстреної логістики. *Системні технології*. 2023. Т. 6, № 149. с. 107-122. DOI: <https://doi.org/10.34185/1562-9945-6-149-2023-09>
15. Катренко А. В., Антоняк Т. І. Розв'язання задач оптимального розміщення об'єктів методом імітаційного моделювання. *Вісник. Інформаційні системи та мережі*. 2011. № 715. С. 150–162
16. Kostyuchenko L.V., Marchuk V.Ye., Harmash O.M. Development of recycling infrastructure in Ukraine. *Electronic Scientific Journal "Intellectualization of Logistics and Supply Chain Management"*, 2021. Vol. 9. P. 44–52. DOI: 10.46783/smart-scm/2021-9-4
17. Із третього світу в перший. Реформа управління відходами в Україні. PWC. URL: <https://www.pwc.com/ua/en/survey/2020/waste-management.pdf> (дата звернення: 15.04.2025).
18. Мартиненко А. Міф про безпечне сміттєспалювання. *ГС Український Альянс Нуль Відходів*. URL: <https://zwsociety.org/wp-content/uploads/mif-pro-bezpechne-smittyespalyuvannya.pdf> (дата звернення: 22.04.2025).
19. Xiaoxia Cao, Paul N. Williams, Yuanhang Zhan, Scott A. Coughlin, John W. McGrath, Jason P. Chin, Yingjian Xu. Municipal solid waste compost: Global trends and biogeochemical cycling. *Soil & Environmental Health*. Vol. 1 No. 4. 2023. DOI: 10.1016/j.seh.2023.100038
20. Edo-Alcon N, Gallardo A, Colomer-Mendoza FJ, Lobo A. Efficiency of biological and mechanical-biological treatment plants for MSW: The case of Spain. *Heliyon*. 2024. Vol. 10 no. 4. DOI: 10.1016/j.heliyon.2024.e26353
21. European Waste Treatment and Disposal Number of Enterprises by Country. *ReportLinker*. URL: <https://www.reportlinker.com/dataset/18a291d77e387c50e181b0c0e68e784476cc0ca5> (date of access: 07.05.2025).
22. Us S. A., Koriashkina L. S., Stanina O. D. An optimal two-stage allocation of material flows in a transport-logistic system with continuously distributed resource. *Radio Electronics, Computer Science, Control*. (2019). Vol. 1. DOI: 10.15588/1607-3274-2019-1-24
23. Kiseleva, E., Prytomanova, O., Hart, L. Solving a Two-stage Continuous-discrete Problem of Optimal Partitioning-Allocation with Subsets Centers Placement. *Open Computer Science*. 2020. Vol. 10, No. 1. P. 124-136. DOI: <https://doi.org/10.1515/comp-2020-0142>

References

1. Lytvynenko, O., Pavlov, K., Mykhailova, L. (2021), "Waste management in Ukraine: organizational aspects". *E3S Web of Conferences*, 280, 11004 p. DOI: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202128011004>
2. Shyshkin, E., Haiko, Y., Chernonosova, T. (2024), "Approaches to Recycling Construction Waste during the Post-War Reconstruction of Devastated Cities". *Urban Planning and Territorial Development*, 85, P. 679–697. DOI: <https://doi.org/10.32347/2076-815x.2024.85.679-697>
3. Kikot, M., Maleieva, Y. (2024), "Models of forming logistics infrastructure for complex equipment recycling". *Current State of Scientific Research and Technologies in Industry*, 3(29), P. 15–28. DOI: <https://doi.org/10.30837/2522-9818.2024.3.015>
4. Wang, H., Luo, P., Wu, Y. (2023), "DOI: Research on the location decision-making method of emergency medical facilities based on WSR". *Sci Rep.*, 13(18011). DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-023-44209-0>

5. Dissanayake, I., Gunathilake, M. (2024), "A comprehensive survey of recent advances in facility location problems: Models, solution methods, and applications". *Journal of Sustainable Development of Transport and Logistics*, 9(2), P. 78–90. DOI: <https://doi.org/10.14254/jsdtl.2024.9-2.6>
6. Kazakovtsev, L., Rozhnov, I., Shkaberina, G. (2021), "Self-Configuring (1 + 1)-Evolutionary Algorithm for the Continuous p-Median Problem with Agglomerative Mutation". *Algorithms*, 14(130). DOI: <https://doi.org/10.3390/a14050130>
7. Christopher R. Houck, Jeffrey A. Joines, Michael G. Kay. (1996), "Comparison of Genetic Algorithms, Random Restart, and Two-Opt Switching for Solving Large Location-Allocation Problems". *Computers & Operations Research*, 22(6), P. 587–596.
8. Zhang, Y., Li, J., Zhu, Y., Xu, H. (2022), "An Improved Genetic Algorithm for Location Allocation Problem with Grey Theory in Public Health Emergencies". *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 19(15(9752)). DOI: <https://doi.org/10.3390/ijerph19159752>
9. Koriashkina, L., Lubenets, D. (2023), "Mathematical Models and Methods of Multiplex Partitioning and Multiple Coverage of Sets for Location-Allocation Problems". *Information Technology: Computer Science, Software Engineering and Cyber Security*, 4, P. 20–31. DOI: <https://doi.org/10.32782/IT/2023-4-3>
10. Kiseleva, A. I., Prytomanova, O. M., Us, S. A. (2020), "Solving a Two-Stage Continuous-Discrete Problem of Optimal Partition–Allocation with a Given Position of the Centers of Subsets". *Cybern Syst Anal.*, 56, P. 1–12. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10559-020-00215-y>
11. Stanina, O. D. (2019), "Models and Methods for Locating Two-Stage Production with Continuously Distributed Resource" [Doctoral dissertation, National Technical University "Dnipro Polytechnic"]. Karazin University. 2019. 188 p.
12. Peidro, D., Martin, X.A., Panadero, J. (2024), "Solving the uncapacitated facility location problem under uncertainty: a hybrid tabu search with path-relinking simheuristic approach". *Appl Intell.*, 54, P. 5617–5638. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10489-024-05441-x>
13. Szczepanski, E., Jachimowski, R., Izdebski, M., Jacyna-Golda, I. (2019), "Warehouse location problem in supply chain designing: a simulation analysis". *Archives of Transport*, 50(2), P. 101–110. DOI: <https://doi.org/10.5604/01.3001.0013.5752>
14. Koriashkina, L. S., Dziuba, S. V. (2024), "Mathematical Models and Methods for Facility Location and Territory Zoning in Emergency Logistics Systems". *System Technologies*, 6(149), P. 107–122. DOI: <https://doi.org/10.34185/1562-9945-6-149-2023-09>
15. Katrenko, A. V., Antonyak, T. I. (2011), "Solving Optimal Facility Location Problems by Simulation Modeling". *Bulletin. Information Systems and Networks*, (715), P. 150–162.
16. Kostiuchenko, L.V., Marchuk, V. Ye., Harmash, O. M. (2021), "Development of recycling infrastructure in Ukraine". *Electronic Scientific Journal "Intellectualization of Logistics and Supply Chain Management"*, 9, P. 44–52. DOI: <https://doi.org/10.46783/smart-scm/2021-9-4>
17. PWC. (2020), "From Third World to First. Waste Management Reform in Ukraine". PWC. available at: <https://www.pwc.com/ua/en/survey/2020/waste-management.pdf>
18. Martinenko, A. (2020), "The Myth of Safe Waste Incineration". *Ukrainian Zero Waste Alliance NGO*. available at: <https://zwsociety.org/wp-content/uploads/mif-pro-bezpechne-smittyespalyuvannya.pdf>
19. Xiaoxia, Cao, Paul, N. Williams, Yuanhang, Zhan, Scott, A. Coughlin, John, W. McGrath, Jason, P. Chin, Yingjian Xu. (2023), "Municipal solid waste compost: Global trends and biogeochemical cycling". *Soil & Environmental Health*, 1(4). DOI: <https://doi.org/10.1016/j.seh.2023.100038>
20. Edo-Alcon, N, Gallardo, A, Colomer-Mendoza, FJ, Lobo, A. (2024), "Efficiency of biological and mechanical-biological treatment plants for MSW: The case of Spain". *Heliyon*, 10(4). DOI: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e26353>
21. ReportLinker. (2023), "European Waste Treatment and Disposal Number of Enterprises by Country". *ReportLinker*. available at: <https://www.reportlinker.com/dataset/18a291d77e387c50e181b0c0e68e784476cc0ca5>
22. Us, S. A., Koriashkina, L. S., Stanina, O. D. (2019), "An optimal two-stage allocation of material flows in a transport-logistic system with continuously distributed resource". *Radio Electronics, Computer Science, Control*, 1. DOI: <https://doi.org/10.15588/1607-3274-2019-1-24>
23. Kiseleva, E., Prytomanova, O., Hart, L. (2020), "Solving a Two-stage Continuous-discrete Problem of Optimal Partitioning-Allocation with Subsets Centers Placement". *Open Computer Science*, 10(1), P. 124–136. DOI: <https://doi.org/10.1515/comp-2020-0142>

Відомості про авторів / About the Authors

Кікоть Максим Сергійович – аспірант, Національний аерокосмічний університет "ХАІ", кафедра комп'ютерних наук, Харків, Україна; e-mail: maxym111111@gmail.com; ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0005-7554-9246>

Малєєва Юлія Анатоліївна – кандидат технічних наук, Національний аерокосмічний університет "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 – PhD Student, National Aerospace University "Kharkiv Aviation Institute", Department of Computer Science, Kharkiv, Ukraine.

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

MODEL OF LOGISTICS INFRASTRUCTURE FOR THE TWO-STAGE RECYCLING PROCESS OF COMPLEX EQUIPMENT

Subject matter: models for the formation of the logistics infrastructure for complex equipment recycling, taking into account the two-stage processing system and the multicomponent composition of secondary raw materials. **This study aims** to develop a model for the formation of a logistics infrastructure for complex equipment recycling enterprises, the implementation of which will reduce transportation costs of secondary raw materials and infrastructure development expenses. **Objectives:** to investigate the current state and challenges of complex equipment recycling in Ukraine and abroad; to identify the characteristics of logistics processes in complex equipment recycling; to develop a model for the formation of recycling logistics infrastructure for complex equipment. The following **methods** were used during the research: mathematical modeling, location-allocation methods, and systems approach. **Research results:** the current state and challenges of complex equipment recycling have been analyzed, including infrastructure deficiencies, a low level of sorting, and uneven distribution of processing facilities; approaches to solving the facility location problem for recycling infrastructure have been reviewed; a two-level structure of the complex equipment recycling system has been developed, consisting of a network of local collection and sorting centers and processing enterprises; a mathematical model for forming the logistics infrastructure has been developed, considering production capacities, transportation costs and the multicomponent nature of resources. The **conclusions** state that the proposed optimization model for the logistics infrastructure of complex equipment recycling considers a two-stage processing sequence, from collection and sorting to final recycling. The model integrates economic, spatial, and technological factors, enabling the minimization of total transportation and infrastructure development costs. The application of the proposed model ensures effective planning of the recycling network, taking into account processing capacities, logistical routes, and the volume of different types of secondary raw materials.

Keywords: recycling; secondary raw material processing; complex equipment; optimization model; infrastructure; logistics; two-stage system.

Бібліографічні описи / Bibliographic descriptions

Кікоть М. С., Малєєва Ю. А. Модель логістичної інфраструктури двохетапного процесу ресайклінгу складної техніки. *Сучасний стан наукових досліджень та технологій в промисловості*. 2025. № 3 (33). С. 19–32. DOI: <https://doi.org/10.30837/2522-9818.2025.3.019>

Kikot, M., Malieieva, Y. "Models of forming logistics infrastructure for complex equipment recycling", *Innovative Technologies and Scientific Solutions for Industries*, No. 3 (33), P. 19–32. DOI: <https://doi.org/10.30837/2522-9818.2025.3.019>