

## АВТОМАТИЗАЦІЯ ПІДПРИЄМСТВ ПЕРЕРОБКИ ПОБУТОВИХ ВІДХОДІВ: СВІТОВИЙ ДОСВІД ТА ПЕРСПЕКТИВИ ДЛЯ УКРАЇНИ

<sup>1</sup>Вінницький національний технічний університет

*Проаналізовано сучасні світові тенденції у сфері переробки побутових відходів з акцентом на передовий досвід таких країн як Німеччина, Японія, Південна Корея, Швеція та США. Особливу увагу приділено новітнім технологіям автоматизованого сортування, серед яких комп'ютерний зір, ближня інфрачервона спектроскопія (NIR), штучний інтелект (AI) та роботизовані системи, які суттєво підвищують точність та ефективність процесів переробки. Досліджено технічні характеристики впроваджуваних систем, а також їхні економічні показники, які демонструють значний потенціал для зниження витрат і підвищення рентабельності діяльності підприємств у цій галузі.*

*Авторами здійснено комплексний аналіз практик та рішень, які дозволяють покращити показники екологічної стійкості та ресурсоефективності, зокрема завдяки впровадженню циркулярної економіки. Визначено основні фактори, що сприяють ефективній імплементації новітніх технологій, а також ключові бар'єри, з якими стикаються підприємства на етапах інтеграції інноваційних технологій у виробничий процес. У статті окреслено перспективні шляхи вирішення цих проблем, що сприятиме подальшому розвитку галузі та досягненню глобальних екологічних цілей. Також акцентовано на важливості освітніх та інформаційних заходів серед населення для підвищення ефективності роздільного збирання відходів.*

*Проведене дослідження підкріплено конкретними прикладами застосування сучасних технологій на практиці, зокрема у випадках мобільних систем сортування відходів, інтеграції GPS-технологій для оптимізації логістики та використання штучного інтелекту для аналізу і прогнозування ефективності переробних процесів. В результаті аналізу зроблено висновок щодо важливості міжнародного співробітництва та трансферу технологій задля прискорення переходу до сталих і ресурсоефективних моделей управління відходами.*

**Ключові слова:** переробка відходів, автоматизація сортування, комп'ютерний зір, інфрачервона спектроскопія, штучний інтелект, роботизовані системи.

### Вступ

Проблема поводження з побутовими відходами набуває дедалі більшої актуальності в умовах урбанізації, зростання чисельності населення та споживчої активності. Побутові відходи формуються в результаті функціонування домогосподарств, підприємств торгівлі, громадського харчування та промислових об'єктів. Основними категоріями таких відходів є пластик, метал, скло, папір, органічні залишки, а також електронні відходи.

За даними Світового банку, станом на 2018 рік понад 2 мільярди осіб у світі не мали доступу до належної інфраструктури збору та обробки твердих побутових відходів (ТПВ). Така ситуація спричиняє істотні екологічні та санітарно-епідеміологічні загрози, зокрема забруднення ґрунтів, водних ресурсів і атмосферного повітря, а також поширення патогенних мікроорганізмів.

Структура побутових відходів суттєво відрізняється залежно від рівня економічного розвитку країн. У країнах з високим рівнем доходу переважають сухі відходи, придатні до вторинної переробки (пластик, папір, картон, метал, скло), які становлять у середньому близько 51 % від загального об'єму. У країнах з низьким рівнем доходу, навпаки, домінують органічні фракції, зокрема харчові залишки та органічні відходи.

Прогнозується, що до 2050 року загальний обсяг ТПВ у світі зросте до 3,40 млрд. тонн, що перевищить темпи зростання населення за той самий період. Попри це, у більшості держав спостерігається низький рівень організованості поводження з відходами, що призводить до їх неконтрольованого спалювання або накопичення, без отримання корисної енергії або зменшення об'ємів сміття [1].

### Результати дослідження

Основними тенденціями в управлінні відходами є концепції “zero waste” та “circular economy”, які спрямовані на зменшення кількості утворюваних відходів та підвищення рівня їх переробки та повторного використання. Розглянемо, як вирішують проблему переробки побутових відходів передові країни світу.

Німеччина — лідер у поводженні з відходами. Використовує п'ятирівневу ієрархію: запобігання, повторне використання, переробка, енергетична утилізація, захоронення. Роздільне збирання (папір — синій, пластик — жовтий, органіка — коричневий, скло — за кольорами). У 2020 році: 47,8 % відходів перероблено, 19,3 % — компостовано, 70 % паперу — на вторинну переробку, 90 % будівельних відходів перероблено. Система “Green Dot” стимулює мінімізацію пакування. Застосовуються механічне та оптичне сортування [2].

В Японії висока дисципліна сортування населенням забезпечує ефективну переробку значних обсягів відходів. Громадяни ретельно розділяють сміття на категорії, такі як папір, пластик, скло, метал та органічні відходи, що полегшує процеси вторинної переробки. Інновації у переробці: трансформація відходів у водень, етанол, етилен та інші базові хімічні речовини, які використовуються в промисловості. Уряд підтримує дослідження та впровадження технологій, спрямованих на замкнений цикл виробництва. Великі міста, такі як Токіо, мають розвинену інфраструктуру сортувальних станцій і заводів, що працюють з мінімальним впливом на довкілля. Освітні кампанії підвищують обізнаність громадян, а штрафи за порушення правил сортування забезпечують дотримання стандартів [3].

Південна Корея демонструє високу ефективність у сфері управління побутовими відходами, зокрема завдяки впровадженню системи “Jongnyangje”, яка передбачає обов'язкове сортування відходів безпосередньо на місці їх утворення. Громадяни зобов'язані розподіляти відходи на харчові, придатні до вторинної переробки, громіздкі предмети та звичайне сміття. Особливу увагу приділено харчовим відходам, які збираються окремо та переробляються у корми для тварин або органічні добрива, що сприяє зменшенню обсягів сміття та розвитку циркулярної економіки.

Інноваційним елементом системи є запровадження принципу “плати за те, що викидаєш” (Pay-as-you-throw) для харчових відходів, згідно з яким мешканці оплачують утилізацію залежно від кількості вироблених органічних відходів. Такий підхід формує відповідальну поведінку у сфері поводження з відходами та сприяє їх зменшенню. У 2023 році обсяг харчових відходів у країні знизився на 16 % — з 440 тис. тонн до 370 тис. тонн.

У столиці Південної Кореї — місті Сеул запроваджено автоматизовані контейнери із системами радіочастотної ідентифікації (RFID), які ідентифікують користувача, зважують кількість викинутих харчових відходів та автоматично нараховують відповідну плату. Така інтеграція дозволяє не лише зменшити кількість відходів, а й підвищити ефективність їх подальшої переробки [4].

Швеція є лідером в енергетичній утилізації відходів для опалення та виробництва електроенергії. Діє політика розширеної відповідальності виробника (EPR), яка зобов'язує виробників нести відповідальність за утилізацію своєї продукції після завершення її життєвого циклу. Унікальною особливістю шведської системи є те, що країна імпортує відходи з інших країн, аби забезпечити повну завантаженість своїх енергетичних установок. Це свідчить про високий рівень інфраструктурної готовності та ефективності переробної галузі. Завод SITE ZERO переробляє 42 т пластику на годину, розділяючи його на 12 фракцій. Це дозволяє максимально зберігати матеріальні ресурси та зменшувати обсяг сміття, що підлягає захороненню [5].

США та Канада акцентують на вторинному використанні та зменшенні навантаження на довкілля. У США: автоматизоване сортування з III підвищує точність і швидкість, знижуючи потребу в ручній праці. Хімічна переробка пластику розкладає матеріали на базові елементи для створення нових полімерів чи продуктів, зокрема складні види пластику. Розвинена переробка паперу зменшує потребу в деревині та енергії, забезпечуючи виробництво упаковки, офісного паперу, картону. Рівень переробки — 32 %, мета — 50 % до 2030 року. У Канаді активно розвиваються матеріалоощадні заводи (MRF), подібні до США, з фокусом на підготовку сировини. Уряд підт-

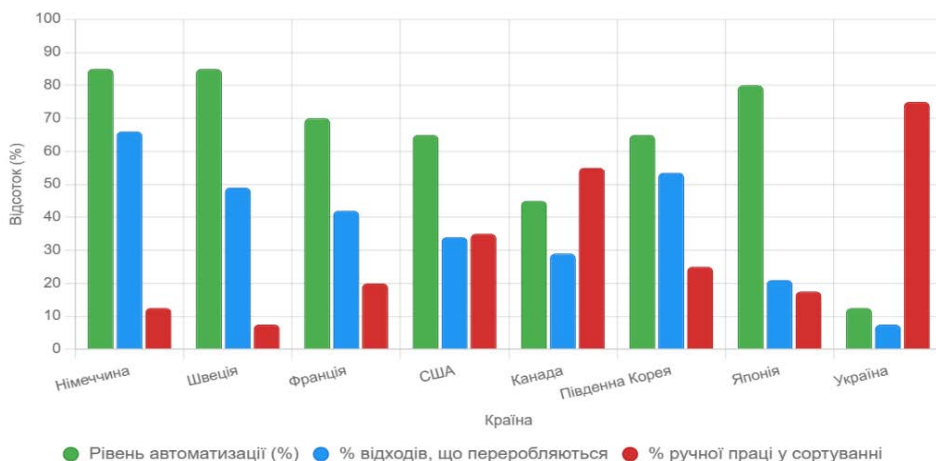
римує ініціативи зі сталого розвитку, включно із субсидіями на модернізацію інфраструктури. Освітні програми заохочують громадян до сортування, а регіональні проекти спрямовані на компостування органічних відходів [6], [7].

Порівняймо рівень автоматизації, відсоток відходів, що переробляється та відсоток ручної праці у переробці побутових відходів провідних країн світу та України.

#### Порівняння рівня автоматизації переробки побутових відходів у різних країнах

| Країна         | Рівень автоматизації (%) | Загальна кількість відходів (млн т/рік) | % відходів, що переробляються | % ручної праці у сортуванні | Основні автоматизовані технології                            | Кількість автоматизованих підприємств | Рівень впровадження ШІ/робототехніки (%) | Собівартість переробки (\$/т) |
|----------------|--------------------------|-----------------------------------------|-------------------------------|-----------------------------|--------------------------------------------------------------|---------------------------------------|------------------------------------------|-------------------------------|
| Німеччина      | 80...90                  | ~50                                     | 66                            | 10...15                     | Оптичне сортування, ШІ, роботи                               | >100                                  | 70...80                                  | 90...120                      |
| Швеція         | 85                       | ~4                                      | 49                            | 5...10                      | Робототехніка, автоматизовані конвеєри                       | >30                                   | 60                                       | 100...130                     |
| Франція        | 70                       | ~35                                     | 42                            | 20                          | Оптичні сенсори, автоматизовані лінії                        | >60                                   | 50                                       | 110...140                     |
| США            | 60...70                  | ~260                                    | 32                            | 30...40                     | Оптичне сортування, ШІ, RFID                                 | >200                                  | 40...50                                  | 80...110                      |
| Канада         | 40-50                    | ~37                                     | 29                            | 50...60                     | IoT, автоматизовані сортувальні лінії, аналітика даних       | ~50                                   | 20...30                                  | 0,6...0,8                     |
| Південна Корея | 60...70                  | ~20                                     | 50...57                       | 20...30                     | AWCS (автоматизовані підземні системи збору), RFID, PAUT, ШІ | >30                                   | 40...50                                  | 0,3...0,5                     |
| Японія         | 75...85                  | ~43                                     | 20...22                       | 15...20                     | Роботи для небезпечних відходів, ШІ                          | >50                                   | 60...70                                  | 110...150                     |
| Україна        | 10...15                  | ~11                                     | 5...10                        | 70...80                     | Механічне сортування, ручна праця, RFID (пілот)              | <10                                   | 5...10                                   | 50...70                       |

*Примітки:* Рівень автоматизації (%) — це частка процесів сортування та переробки, що виконуються автоматизовано; загальна кількість відходів — орієнтовна річна кількість побутових відходів; % відходів, що переробляються — це частка відходів, які реально піддаються вторинній переробці; % ручної праці — оцінка частки участі людини у процесах сортування; основні автоматизовані технології: найпоширеніші рішення; кількість автоматизованих підприємств — приблизна кількість заводів, що мають автоматизовані лінії; рівень впровадження штучного інтелекту (ШІ)/робототехніки (%) — частка підприємств, де використовуються ці технології; собівартість переробки (\$/т) — середня вартість переробки 1 тони відходів [8]—[11].



Порівняння рівня автоматизації, переробки відходів та ручної праці

Подані дані демонструють (рис.), що найвищі показники автоматизації процесів сортування та переробки побутових відходів спостерігаються у Швеції та Німеччині (понад 80 %), що корелює з високою часткою відходів, які підлягають вторинній переробці (49...66 %), та низьким рівнем залучення ручної праці. У зазначених країнах активно впроваджуються сучасні технології, зокрема роботизовані системи, штучний інтелект, сенсорне та оптичне сортування. Натомість в Україні

рівень автоматизації залишається найнижчим серед розглянутих країн (10...15 %), що супроводжується значною часткою ручної праці (70...80 %) та обмеженим використанням інноваційних технологій. Така ситуація свідчить про необхідність технологічної модернізації галузі та впровадження кращих світових практик.

Окрему увагу заслуговує ситуація в Японії: попри високий рівень автоматизації (75...85 %), частка відходів, що підлягають переробці, залишається відносно низькою (20...25 %), що зумовлено переважанням практики термічної утилізації (спалювання) відходів у системі управління ТПВ.

### Роль сучасних технологій

Сучасні технології трансформують переробку відходів, підвищуючи точність сортування, знижуючи витрати та мінімізуючи вплив на довкілля. Ключові напрями — комп'ютерний зір, ближня інфрачервона спектроскопія (NIR) та штучний інтелект в автоматизованих системах.

Комп'ютерний зір застосовується для розпізнавання візуальних образів відходів безпосередньо на конвеєрі, що дає змогу здійснювати сортування з точністю до 95...98 %. Системи обладнуються високоточними цифровими камерами з роздільною здатністю від 2 до 20 мегапікселів, що дозволяє фіксувати дрібні деталі навіть на високій швидкості руху потоку відходів. Алгоритми обробки зображень функціонують у реальному часі, досягаючи швидкості обробки до 20 000 об'єктів за годину завдяки багатоканальній архітектурі та паралельній обробці даних [12].

Ближня інфрачервона спектроскопія (NIR) дає змогу визначати хімічний склад матеріалів на основі їхніх спектральних характеристик у діапазоні 780...2500 нм, що дозволяє ідентифікувати спектральні «відбитки» полімерів, паперу, скла та інших речовин. Точність розпізнавання залежить від спектральної роздільної здатності сенсорів (10...20 нм) і якості джерела світла. Основними перевагами NIR є висока швидкість, точність та дистанційність вимірювання.

Штучний інтелект виконує функцію аналізу великих обсягів даних, отриманих від систем комп'ютерного зору та NIR-сенсорів. Завдяки глибоким нейронним мережам, які навчаються на тисячах прикладів, алгоритми здатні розпізнавати навіть мінімальні відмінності між типами відходів. До того ж такі системи мають здатність до самонавчання, що дозволяє їм адаптуватися до змін у складі відходів та підвищувати свою ефективність з часом [13].

На світовому ринку зростає тенденція впровадження передових технологій у галузі автоматизованого сортування відходів. Такі компанії як TOMRA Sorting Solutions, AMP Robotics та ZenRobotics, займають провідні позиції у цій сфері.

TOMRA Sorting Solutions пропонує комплексні рішення, які інтегрують комп'ютерний зір, NIR-аналіз, штучний інтелект та інноваційні алгоритми для розпізнавання навіть невеликих домішок у матеріалах. На одному з європейських підприємств впровадження системи TOMRA дозволило скоротити витрати на ручну перевірку сортування на 50 % та збільшити обсяг перероблених матеріалів на 35 % завдяки точнішій класифікації сміття.

AMP Robotics спеціалізується на застосуванні глибокого навчання для адаптивного сортування. Їхні системи використовують спеціальні датчики та камери високої роздільної здатності, забезпечуючи точність до 98 %. Система здатна адаптуватися до змін у складі відходів в режимі реального часу. На одному з підприємств у США впровадження систем AMP Robotics дозволило знизити відсоток помилок на 30 % та підвищити загальну продуктивність на 20 %.

ZenRobotics впроваджує роботизовані системи, які поєднують передові технології комп'ютерного зору та робототехніки. Завдяки модульній конструкції роботизованих систем їх легко інтегрувати у вже наявні сортувальні лінії. У Фінляндії та Швеції застосування систем ZenRobotics дозволило підвищити ефективність сортування до 98 %, а також знизити витрати на експлуатацію завдяки автоматизованому управлінню роботами.

Компанії STEINERT, Bollegraaf і Pellenc ST є менш популярними, але також розробляють продуктивні системи для ефективного управління відходами. Автоматизація з комп'ютерним зором, NIR та ШІ підвищує ефективність переробки, скорочує ручну працю та оптимізує ресурси.

Мобільні заводи, такі як SortX від Everwave та STADLER, переробляють до 30 м<sup>3</sup> відходів на годину, з яких близько 80 % виявилось придатним для повторного використання завдяки високій частці ПЕТ-пляшок у відходах [14].

Іншим прикладом мобільної установки є Trashpresso від тайванської компанії Miniwiz. Ця автономна станція переробки працює на сонячній енергії та здатна переробляти до 500 кг пластикових і текстильних відходів щодня. Процес включає сортування за допомогою штучного інтелекту,

миття, подрібнення, плавлення та формування матеріалів у будівельні плитки. Trashpresso може виготовляти до 10 квадратних метрів плитки кожні 40 хвилин. Кожна плитка містить еквівалент близько п'яти пластикових пляшок. Установка вже використовувалася в Тибеті для очищення туристичних зон та створення будівельних матеріалів з місцевих відходів. Завдяки компактному дизайну (вона розміщена в контейнері, який можна транспортувати вантажівкою) та демонструє високу мобільність і здатність працювати в ізольованих регіонах [15].

Однією з самих швидкозростаючих категорій відходів у світі є електронні відходи. У 2022 році вироблено близько 62 мільйонів тонн електронних відходів, а до 2030 року очікується зростання до 82 мільйонів тонн. Переробка електроніки ускладнена наявністю токсичних речовин та складністю сортування компонентів. Сучасні технології включають методи гідрометалургії та пірометалургії для вилучення рідкісних металів з електроніки. ЄС, Китай та США мають програми з утилізації електроніки. Китай планує переробляти половину своїх електронних відходів до 2025 року [16].

Переробка органічних відходів здійснюється за допомогою біореакторів, які дозволяють отримувати біогаз через анаеробне зброджування. Такі системи використовуються для переробки харчових відходів та інших біологічних матеріалів. До того ж, промислове компостування застосовується в країнах, таких як Австрія та Франція для переробки великих обсягів органічних відходів у добрива [17].

Автоматизовані рішення у сфері збору та транспортування ТПВ базуються на застосуванні інтелектуальних контейнерів, оснащених сенсорами заповнення, а також систем GPS-моніторингу для контролю руху смітєвозів. Сенсори, інтегровані у контейнери, дозволяють у режимі реального часу відстежувати рівень їхнього наповнення та передавати відповідні дані до центрів управління. Це створює можливість динамічного планування маршрутів, що, у свою чергу, сприяє зменшенню кількості рейсів та оптимізації витрат на логістику.

Використання систем глобального позиціонування (GPS) у поєднанні з аналітичними інструментами дозволяє раціоналізувати маршрути пересування спеціалізованого транспорту, що веде до скорочення споживання пального та зменшення викидів парникових газів. Такий підхід відповідає принципам сталого розвитку та забезпечує підвищення ефективності всієї системи управління відходами [18].

### Основні проблеми та напрямки розвитку галузі в Україні

Сьогодні Україна ще дуже далека від ідеалу в переробці побутових відходів — наразі цей показник сягає всього 10...15%. Особливо гостро проблема постає в малих містах, де часто бракує навіть елементарної інфраструктури — сортувальних ліній та переробних підприємств.

Сучасні переробні підприємства використовують різні рівні автоматизації, які можна класифікувати за такими напрямками:

1. Сортувальні лінії та сенсорні технології: на більшості підприємств, де є хоч якась автоматизація процесів сортування, використовують конвеєрні стрічки з ручним відбором, а також базові механічні та магнітні сепаратори (для відокремлення металу). У низці регіонів уже починають застосовувати сучасні оптичні сепаратори (NIR, ультрафіолетові, кольорові сканери), які, до прикладу, дозволяють автоматично відокремлювати пластик різних типів та скло, що суттєво підвищує якість сортування.

2. Автоматизація на механіко-біологічних комплексах: у кількох областях (наприклад Львівській, Київській, Харківській) впроваджено або планується впроваджувати механіко-біологічні комплекси з вищим ступенем автоматизації: сортувальні станції, лінії для механічного відділення органічної фракції з подальшим компостуванням або анаеробним зброджуванням. Такі комплекси дають змогу отримувати біогаз або компост, зменшувати обсяг відходів, що захоронюються, а також виділяти ресурси, придатні для вторинної переробки.

3. Роботизоване сортування та штучний інтелект. Хоча в Україні наразі дуже мало прикладів впровадження роботизованих систем (аналогічних до світових прикладів AMP Robotics чи ZenRobotics), проте є поодинокі стартапи і пілотні проекти, які використовують елементи машинного навчання для розпізнавання та сортування відходів. Основна перешкода — висока вартість обладнання та нестабільні обсяги сировини, однак інтеграція України в європейський ринок створює перспективи поступового зростання цього сегмента.

4. Автоматизовані системи обліку та моніторингу. Деякі великі оператори (зокрема у Києві, Львові, Дніпрі) починають впроваджувати цифрові платформи контролю за збором та транспорту-

ванням відходів (GPS-моніторинг сміттєвозів, автоматизований облік кількості вивезених контейнерів тощо). Це важливий крок до прозорості та підвищення ефективності логістики, хоча такі рішення поки використовуються вибірково й потребують подальшого масштабування [19].

За даними Міністерства розвитку громад, територій та інфраструктури України, станом на 2022 рік ситуація з управлінням відходами залишається складною через низький рівень переробки та велику кількість несанкціонованих звалищ. У країні діє понад 600 офіційних полігонів, але значна частина з них не відповідає європейським екологічним вимогам. Несанкціоновані звалища та застарілі полігони є серйозними екологічними ризиками. В Україні планується поступово закрити або модернізувати застарілі полігони [20], [21] та розвивати переробні потужності [22]. Проекти міжнародної допомоги та гранти можуть стати поштовхом для впровадження інноваційних систем сортування та переробки відходів [23].

Важливим кроком стало затвердження Кабінетом Міністрів України Національного плану управління відходами до 2033 року. Він передбачає перехід до циркулярної економіки та збільшення рівня переробки відходів до 35 % до 2040 року [24].

Автоматизація сортування і робототехніка можуть значно підвищити ефективність, зменшуючи необхідність залучати людей до ручної праці. До того ж, розвиток біореакторів для виробництва біогазу з органічних відходів та впровадження цифрових технологій для моніторингу процесів можуть стати ключовими напрямками розвитку галузі [25].

Основними напрямками розвитку автоматизації можуть бути:

1. Впровадження роботизованих систем сортування з комп'ютерним зором та машинним навчанням дозволяють зменшити кількість ручної праці та підвищити точність сортування;
2. Співпраця українських підприємств з іноземними інвесторами та виробниками робототехніки сприятиме швидшій модернізації обладнання;
3. Розробка автоматизованих центрів збору побутових відходів, наприклад спеціальних автоматів для прийому пластикових пляшок (PET) та інших переробних матеріалів. Такі центри дозволять збільшити ефективність збору відходів та забезпечити їх подальшу автоматизовану переробку, зменшуючи потребу в ручному сортуванні та сприяючи підвищенню рівня екологічної відповідальності серед населення;
4. Впровадження біореакторів для виробництва біогазу з органічних відходів дозволяє перетворювати органічні відходи на біогаз, який може використовуватися як джерело енергії для опалення або виробництва електроенергії. Цей процес сприяє зменшенню кількості відходів, що потрапляють на полігони, та забезпечує альтернативне, відновлюване джерело енергії, що відповідає принципам циркулярної економіки;
5. Автоматизовані системи логістики та контролю передбачають встановлення датчиків заповнення контейнерів, GPS-моніторинг руху сміттєвозів та алгоритми оптимізації маршрутів збору відходів, що сприяють зниженню витрат на паливо та покращують ефективність їхньої роботи. Деякі міста, зокрема Львів і Київ, уже впроваджують подібні системи;
6. Використання технологій Інтернету речей (IoT) для збору даних про склад відходів, динаміку їх утворення в різних районах та сезонні зміни, а також об'єднання даних з геоінформаційними системами дозволяє здійснювати ідентифікацію найпроблемніших ділянок та планувати оптимальне розміщення нових переробних потужностей;
7. Встановлення онлайн-станцій моніторингу дозволяє здійснювати автоматизацію екологічного контролю якості повітря та ґрунту поблизу переробних комплексів з автоматизованим передаванням даних до централізованої бази даних Міністерства захисту довкілля та природних ресурсів. Така система дозволить оперативно виявляти перевищення гранично допустимих викидів і приймати коригувальні заходи.

Для того, щоб Україна стала значно ефективнішою у сфері переробки відходів, мають бути здійснені такі кроки:

- створення державної програми підтримки переробки та інвестування у сучасні технології. Вони можуть забезпечити фінансову підтримку підприємств, які впроваджують інноваційні технології переробки відходів;
- впровадження принципу розширеної відповідальності виробника, який буде змушувати компанії розробляти екологічнішу продукцію та зменшувати обсяги відходів;
- колаборація з міжнародними партнерами для впровадження передових рішень, що дозволить Україні отримати доступ до передових технологій та досвіду у сфері переробки відходів;
- проведення освітніх кампаній, які є ключем до підвищення екологічної свідомості. Вони до-

помагають змінити ставлення людей до сортування сміття та залучити більше громадян до активної участі у переробці відходів. В Україні, дуже важливо забезпечити належне інформування населення про важливість правильного сортування та утилізації відходів [26].

Перероблені відходи можуть стати джерелом сировини для подальшого застосування у багатьох сферах: використання пластику для будівництва доріг та виготовлення меблів, що зменшує потребу у первинних матеріалах та знижує кількість відходів; переробка органіки у біогаз та добрива, що сприяє розвитку сільського господарства та зменшенню залежності від синтетичних добрив; виробництво альтернативних матеріалів (еко-плити, текстиль, утеплювачі), що підвищує їхню цінність та знижує вплив на довкілля.

### **Перспективи роботизації для зменшення навантаження на полігони**

Впровадження роботизованих систем сортування твердих побутових відходів (наприклад, типу ZenRobotics, AMP Robotics або TOMRA) дозволяє суттєво зменшити потребу в ручній праці та підвищити точність сортування. У типовому сортувальному підприємстві потужністю до 50 000 тонн відходів на рік зазвичай працюють до 40 операторів у двозмінному режимі. За середнього рівня заробітної плати в галузі на рівні 20 000 грн/місяць витрати на оплату праці персоналу складають орієнтовно 9,6 млн грн на рік.

У результаті впровадження роботизованої системи з машинним зором та штучним інтелектом, яка частково або повністю виконує функції ручного сортування, можливо скоротити чисельність працівників на 45 %, що відповідає зменшенню витрат на оплату праці до 5,28 млн грн/рік. Таким чином, загальна економія становить приблизно 4,32 млн грн/рік, що відповідає зниженню витрат на ручну працю на рівні 45 %.

Окрім прямої економії, автоматизація сприяє підвищенню ефективності підприємства, зниженню ризику помилок під час сортування, зменшенню впливу людського фактора, а також поліпшенню умов праці та безпеки на виробництві.

З метою зниження обсягів відходів, що підлягають захороненню, актуальним є впровадження інноваційних рішень, спрямованих на додаткове сортування та вилучення корисних фракцій уже на етапі полігонного зберігання. Одним з перспективних напрямів є створення роботизованих систем, здатних працювати безпосередньо на полігонах твердих побутових відходів. Такі системи можуть включати автономних роботів, обладнаних маніпуляторами, сенсорами комп'ютерного зору та алгоритмами штучного інтелекту, що дозволяє ідентифікувати та вилучати матеріали, придатні для повторного використання або переробки. Це дає змогу зменшити обсяг залишкових відходів, підвищити ресурсну ефективність полігонів, та поступово готувати їх до етапу рекультивції.

Також доцільним є впровадження інтелектуальних автоматизованих станцій сортування, які можуть бути розміщені у громадських просторах (торгових центрах, на зупинках, у житлових кварталах). Оснащені сенсорними модулями розпізнавання типу матеріалу (пластик, метал, скло, органіка) та мультифракційною системою відсіювання, такі пристрої забезпечують попереднє сортування відходів з високим ступенем точності та можуть інтегруватися з системами заохочення для громадян (наприклад, через бонусну програму або електронні знижки).

Більше того, перспективним є використання мобільних автономних роботів для прибирання відходів у відкритих просторах, зокрема парках, скверах, прибережних зонах. Такі пристрої можуть бути обладнані модулями машинного зору, LIDAR-навігацією та системами виявлення об'єктів, що дозволяє забезпечити ефективне очищення територій без залучення ручної праці. Подібні технології здатні не лише знизити навантаження на полігони, але й сприяти поліпшенню стану довкілля у межах міської інфраструктури.

Таким чином, інтеграція роботизованих рішень у систему управління відходами України відкриває нові можливості для зменшення екологічного навантаження, підвищення рівня автоматизації галузі та досягнення показників сталого розвитку в контексті європейської інтеграції.

### **Висновки**

Світовий досвід у сфері переробки побутових відходів свідчить про ефективність комплексного підходу, що поєднує інституційні, економічні та технологічні рішення. Такі країни, як Німеччина, Японія, Південна Корея та Швеція, демонструють високий рівень організації сортування, активне впровадження циркулярної економіки та широке застосування інноваційних технологій у сфері переробки відходів.

Особливої уваги заслуговує автоматизація процесів сортування за використання комп'ютерного зору, ближньої інфрачервоної спектроскопії (NIR) та штучного інтелекту. Такі системи забезпечують точність ідентифікації матеріалів на рівні понад 97 %, знижують витрати на ручну працю до 45 % та суттєво підвищують загальну ефективність обробки сміття. Через що вони стають ключовим інструментом у досягненні цілей сталого розвитку.

Для України інтеграція автоматизованих технологій та цифрових рішень у сфері поводження з відходами є критично важливою. Незважаючи на наявність окремих позитивних прикладів, загальний рівень переробки залишається низьким, а інфраструктура — недостатньо розвинутою. Стратегічним напрямом має стати модернізація галузі через впровадження інноваційних технологій, розвиток партнерства з міжнародними організаціями, підтримка національних ініціатив і підвищення екологічної свідомості населення.

Отже, подальший розвиток галузі поводження з відходами в Україні має ґрунтуватися не лише на модернізації наявних потужностей, а й на активному впровадженні роботизованих та автономних рішень. Створення систем, здатних ефективно працювати на полігонах, у публічних просторах та під час первинного сортування, стане важливим кроком до зменшення екологічного навантаження та досягнення цілей циркулярної економіки. Матеріали статті можуть бути використані для формування дорожньої карти цифрової трансформації підприємств у сфері переробки відходів в Україні.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- [1] World Bank, *Trends in Solid Waste Management*. [Electronic resource]. Available: [https://datatopics.worldbank.org/what-a-waste/trends\\_in\\_solid\\_waste\\_management.html](https://datatopics.worldbank.org/what-a-waste/trends_in_solid_waste_management.html).
- [2] R. Borchard, R. Zeiss, and J. Recker, "Digitalization of waste management: Insights from German private and public waste management firms," *Waste Management & Research*, no. 40(6), pp. 775-792, 2022. [Electronic resource]. Available: <https://journals.sagepub.com/doi/10.1177/07342424X211029173>. Accessed: 30.03.2025.
- [3] M. Tabuchi, "The Japanese way of recycling waste," *Chemical & Engineering News*, vol. 102, no. 22, 2024. [Electronic resource]. Available: <https://cen.acs.org/environment/Japanese-way-recycling-waste/102/i22>. Accessed: 30.03.2025.
- [4] S.-J. Yoon, "South Korea's Experience with Smart Infrastructure Services: Integrated Solid Waste Management. Inter-American Development Bank," *IDB Monograph*, no. 851, 2019. [Electronic resource]. Available: <https://publications.iadb.org/publications/english/document/South-Koreas-Experience-with-Smart-Infrastructure-Services-Integrated-Solid-Waste-Management.pdf>. Accessed: 30.03.2025.
- [5] A.-K. Bergquist, M. Lindmark, and N. Petrusenko, "Creating Value out of Waste: the Transformation of the Swedish Waste and Recycling Sector, 1970s–2010s," *Business History Review*, no. 97(1), pp. 3-31, 2023. [Electronic resource]. Available: <https://www.cambridge.org/core/journals/business-history-review/article/creating-value-out-of-waste-the-transformation-of-the-swedish-waste-and-recycling-sector-1970s2010s/E5778DC616E3B5ECC6DC053083399F37>. Accessed: 30.03.2025.
- [6] L. Aldieri, G. Ioppolo, C. P. Vinci, and T. Yigitcanlar, "Waste recycling patents and environmental innovations: An economic analysis of policy instruments in the USA, Japan and Europe," *Waste Management*, no. 95, pp. 612-619, 2019. [Electronic resource]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2019.06.045>. Accessed: 30.03.2025.
- [7] Y. Wang, K. T. W. Ng, and A. Z. Asha, "Non-hazardous waste generation characteristics and recycling practices in Saskatchewan and Manitoba, Canada," *Journal of Material Cycles and Waste Management*, no. 18(4), pp. 715-724, 2016. [Electronic resource]. Available: <https://link.springer.com/article/10.1007/s10163-015-0373-z>. Accessed: 30.03.2025.
- [8] D. Kyrychenko, "Digitalization of Waste Sorting as a Factor of Sustainable Development of the Ukrainian Economy," *International Scientific Journal of Engineering and Architecture*, vol. 5, no. 1, pp. 63-68, 2024. [Electronic resource]. Available: <https://isg-journal.com/isjea/article/view/564/316>. Accessed: 30.03.2025.
- [9] V. Starynets, and S. Prykhodko, "Methods of Automated Garbage Sorting Based on Smart Containers," in *Proceedings of the 8th International Workshop on Computer Science and Engineering (WCSE 2024)*, vol. 3486, pp. 1146-1151. [Electronic resource]. Available: <https://ceur-ws.org/Vol-3486/170.pdf>. Accessed: 30.03.2025.
- [10] З'ясувалося, в яких країнах Європи найвищий рівень переробки сміття. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://mind.ua/news/20184056-zyasuvalosya-v-yakih-krayinah-evropi-najvishchij-riven-pererobki-smittya>. Дата звернення: 30.03.2025).
- [11] Japan: Recycling rate of waste 2010–2022. [Electronic resource]. Available: <https://www.statista.com/statistics/1127509/japan-recycling-rate-waste/>. Accessed: 30.03.2025.
- [12] R. Nair, P. Prabhu, et al., "An Automated System for Waste Segregation Using Deep Learning Algorithms," in *2024 3rd International Conference for Innovation in Technology (INOCON)*, pp. 1-6, 2024. <https://doi.org/10.1109/INOCON60754.2024.10511885>.
- [13] A. Sharma, et al., "Innovations in recycling processes for sustainable waste management, Cleaner and Circular Bioeconomy," vol. 5, 2024. [Electronic resource]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2949750724000385>. Accessed: 30.03.2025.
- [14] H. M. Tran, T. M. Le, H. V. Pham, M. T. Vu, and S. V. T. Dao, "An Integrated Learning Approach for Municipal Solid Waste Classification," *IEEE Access*, no. 12, pp. 176569-176585, 2024. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2024.3495982>. Accessed: 30.03.2025.
- [15] Miniwiz News. [Electronic resource]. Available: [https://www.miniwiz.com/news\\_detail.php?id=91](https://www.miniwiz.com/news_detail.php?id=91). Accessed: 30.03.2025.
- [16] Royal Society Publishing. [Electronic resource]. Available: <https://royalsocietypublishing.org/doi/10.1098/rsta.2023.0239>. Accessed: 30.03.2025.
- [17] Sustainable recycling of waste toner powder via pyrolysis (2025). *Journal*. [Electronic resource]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2451904925000561>. Accessed: 30.03.2025.

[18] N. Li, and Y. Chen, "Municipal solid waste classification and real-time detection using convolutional neural network and Graph-LSTM," *Urban Climate*, no. 49, 101462, 2023. [Electronic resource]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2212095523000561> . Accessed: 30.03.2025.

[19] *Переробка сміття в Україні*. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://konsort.com.ua/pererobka-smittya-v-ukrayini/> . Дата звернення: 30.03.2025.

[20] Наказ Міністерства захисту довкілля та природних ресурсів України № 405 від 22.01.2025 «Про затвердження Вимог до експлуатації та рекультивації полігонів після припинення їх експлуатації». [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0405-25#Text> . Дата звернення: 30.03.2025.

[21] *Які вимоги до експлуатації та рекультивації полігонів після припинення їх експлуатації?* [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://ukraine-oss.com/yaki-vymogy-do-ekspluataczyi-ta-rekultyvaczyi-poligoniv-pislya-prypynennya-yih-ekspluataczyi/> . Дата звернення: 30.03.2025.

[22] Постанова Кабінету Міністрів України № 502 від 24.04.2024 «Про внесення змін до деяких постанов Кабінету Міністрів України щодо поводження з відходами». [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/502-2024-%D0%BF#Text> . Дата звернення: 30.03.2025.

[23] Міністерство економіки України. «Гранти для переробних підприємств: 22 виробники зможуть отримати кошти на модернізацію або придбання обладнання». [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://me.gov.ua/News/Detail/62f2c7e6-3d7a-4f50-8f9b-d4901c4d7439?lang=uk-UA&title=GrantiDliaPererobnikhPidprimstv-22-VirobnikiZmozhutOtrimatiKoshtiNaModernizatsiiuAboPridbanniaObladnannia> . Дата звернення: 30.03.2025.

[24] Кабінет Міністрів України затвердив національний план управління відходами до 2033 року. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://www.ekoltava.org/2025/01/22/kabinet-ministriv-ukrayiny-zatverdvyv-natsionalnyj-plan-upravlinnya-vidhodamy-do-2033-roku> . Дата звернення: 30.03.2025.

[25] *Переробка сміття в Україні*. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://hydromarket.com.ua/ua/a502896-pererobka-musora-ukraine.html> . Дата звернення: 30.03.2025.

[26] О. Сергєєв, «Європейський досвід запобігання утворенню побутових відходів та можливості його адаптації в Україні,» *Трансформаційна економіка*, с. 71-77, 2025. <https://doi.org/10.32782/2786-8141/2024-9-11>.

Рекомендована кафедрою комп'ютерних систем управління ВНТУ

Стаття надійшла до редакції 23.05.2025

**Моторний Анатолій Павлович** — аспірант кафедри автоматизації та інтелектуальних інформаційних технологій, e-mail: [anatolii.motorny@gmail.com](mailto:anatolii.motorny@gmail.com) ;

**Кабачій Владислав Володимирович** — канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри автоматизації та інтелектуальних інформаційних технологій, e-mail: [vkabachiy@gmail.com](mailto:vkabachiy@gmail.com) .

Вінницький національний технічний університет, Вінниця

**A. P. Motorny<sup>1</sup>**

**V. V. Kabachii<sup>1</sup>**

## Automation of Household Waste Processing Enterprises: World Experience and Prospects for Ukraine

<sup>1</sup>Vinnitsia National Technical University

*The article provides the analysis of global trends in household waste management and recycling, emphasizing advanced practices from the countries such as Germany, Japan, South Korea, Sweden, and the USA. Special attention is given to cutting-edge automated sorting technologies, including computer vision, near-infrared spectroscopy (NIR), artificial intelligence (AI), and robotic systems, significantly enhancing sorting accuracy and recycling efficiency. The technical characteristics of these implemented systems and their economic performance indicators, demonstrating considerable potential for cost reduction and increased profitability, have been thoroughly studied.*

*The author presents a comprehensive analysis of practices and solutions, enhancing environmental sustainability and resource efficiency, particularly through the implementation of circular economy principles. Key factors facilitating effective integration of advanced technologies, as well as primary barriers faced by enterprises during innovation implementation, are identified. Prospective solutions to these challenges are outlined, promoting further industry development and achieving global environmental goals. The importance of educational and informational campaigns among the population to enhance the efficiency of waste separation is also emphasized in the article.*

*The study includes specific practical examples, demonstrating modern technologies' application, particularly mobile waste sorting systems, GPS technologies for logistics optimization, and artificial intelligence for analyzing and predicting recycling process efficiency. The analysis concludes the critical importance of international cooperation and technology transfer to accelerate the transition towards sustainable and resource-efficient waste management models.*

**Keywords:** waste recycling, sorting automation, computer vision, infrared spectroscopy, artificial intelligence, robotic systems.

**Motorny Anatolii P.** — Post-Graduate Student of the Chair of Intelligent Information Technology and Automation, e-mail: [anatolii.motorny@gmail.com](mailto:anatolii.motorny@gmail.com) ;

**Kabachii Vladyslav V.** — Cand. Sc. (Eng), Associate Professor, Associate Professor of Intelligent Information Technology and Automation, e-mail: [vkabachiy@gmail.com](mailto:vkabachiy@gmail.com)