

СВІТОВИЙ ДОСВІД З ПЕРЕРОБКИ ПОБУТОВИХ ВІДХОДІВ

Вінницький національний технічний університет

Анотація

У статті проаналізовано світовий досвід переробки побутових відходів на прикладі Німеччини, Японії, Південної Кореї, Швеції та США. Розглянуто сучасні технології автоматизованого сортування, такі як комп'ютерний зір, ближня інфрачервона спектроскопія (NIR) та штучний інтелект (AI), що підвищують ефективність переробки та знижують витрати. Досліджено технічні характеристики систем, економічні показники ефективності та перспективи подальшого розвитку галузі. Визначено ключові виклики впровадження новітніх технологій та окреслено можливі шляхи їх подолання для підвищення екологічної стійкості та ресурсоефективності.

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

Abstract

The article analyzes global experience in household waste recycling based on examples from Germany, Japan, South Korea, Sweden, and the USA. It examines modern automated sorting technologies, including computer vision, near-infrared spectroscopy (NIR), and artificial intelligence (AI), which improve recycling efficiency and reduce costs. The study explores technical system characteristics, economic performance indicators, and industry development prospects. Key challenges in implementing new technologies are identified, and potential solutions are outlined to enhance environmental sustainability and resource efficiency.

Keywords: waste recycling, automation, computer vision, infrared spectroscopy, artificial intelligence.

Вступ

За останнє десятиліття проблематика переробки побутових відходів стала однією з найактуальніших завдяки зростаючим обсягам сміття та необхідності збереження природних ресурсів. Сучасні автоматизовані системи, засновані на комп'ютерному зорі, ближній інфрачервоній спектроскопії (NIR) та штучному інтелекті (AI), стають ключовим інструментом у побудові циркулярної економіки. Ці системи забезпечують точне розпізнавання та сортування матеріалів, дозволяючи значно знизити витрати на утилізацію, мінімізувати вплив на довкілля та сприяти повторному використанню ресурсів. Дана стаття аналізує світовий досвід у переробці побутових відходів на прикладі Німеччини, Японії, Південної Кореї, Швеції та США, розглядає впровадження автоматизованих технологій сортування, технічні характеристики систем, конкретні приклади застосування та економічні показники ефективності.

Результати дослідження

Розглянемо, як вирішують проблему переробки побутових відходів світові країни-взірці.

Німеччина є одним з лідерів у сфері переробки відходів в Європі. Її система заснована на п'ятирівневому підході: запобігання утворенню відходів, повторне використання, переробка, енергетична переробка та утилізація відходів. У Німеччині широко використовується система сортування відходів за кольором: скло сортується за кольором, папір збирається у синіх контейнерах, пластик — у жовтому, а органічні відходи — у коричневому. Такий підхід дозволяє Німеччині переробляти понад 67% комунальних відходів. Крім того, Німеччина ввела систему "Green Dot", згідно з якою виробники платять за пакування, що сприяє зменшенню кількості відходів. Ця система стимулює виробників до використання мінімального пакування та розробки більш екологічних продуктів. Німеччина також активно використовує сучасні сортувальні заводи, де застосовуються фізичні процеси для розділення пластикових відходів. Це включає використання ситових барабанів,

магнітів та інфрачервоних технологій для розпізнавання різних типів пластиків. Розглянемо технічні деталі німецької системи:

- Сортивання скла: Німеччина використовує спеціальні машини для сортування скла за кольором, що дозволяє підвищити якість перероблених матеріалів. У 2020 році Німеччина переробила близько 47.8% матеріалів, а 19.3% відходів пішли на компостування чи анаеробне розкладання, що дало загальний рівень переробки 67%.
- Переробка паперу: папір сортується та переробляється у нову паперову продукцію, що зменшує потребу у деревині та енергії. У Німеччині близько 70% паперу переробляється.
- Енергетична переробка: Німеччина активно використовує технології енергетичної переробки відходів, які дозволяють отримувати теплову та електричну енергію з відходів. У 2020 році Німеччина переробила близько 90% будівельних відходів.

Японія відома своєю дисциплінованістю у сортуванні відходів. Жителі країни ретельно сортують сміття за типами, що дозволяє ефективно переробляти велику кількість відходів. Японські компанії активно працюють над розробкою нових технологій переробки, наприклад, перетворення побутових відходів у базові хімічні речовини, такі як водень, етанол та етилен.

Одним з інноваційних підходів є використання мікроорганізмів для виробництва етанолу з відходів. Компанія Sekisui Chemical спільно з американською компанією LanzaTech розробляє технологію, яка дозволяє отримувати етанол з газифікованих відходів. Ця технологія має великий потенціал для заміни традиційних джерел енергії та зменшення залежності від нафти. Розглянемо технічні деталі японської системи:

- Хімічна переробка: японські компанії, такі як Resonac, використовують хімічну переробку пластику для виробництва водню та аміаку. Ця технологія включає дві стадії газифікації, які дозволяють отримувати чистий водень без виділення шкідливих викидів.
- Переробка ртуті: компанія Nomura Kohsan володіє унікальною технологією переробки ртуті, яка відповідає найсуворішим національним стандартам. Ця технологія дозволяє переробляти майже 100% люмінесцентних ламп.
- Газифікація відходів: японські компанії активно розвивають технології газифікації відходів для виробництва синтез-газу, який можна використовувати як паливо для виробництва електроенергії та тепла.

Південна Корея успішно впровадила систему управління відходами під назвою “Jongnyangje”, яка передбачає ретельне сортування відходів на місці утворення. Жителі країни повинні сортувати відходи на харчові, переробні, великі предмети та звичайні відходи. Харчові відходи збираються окремо та переробляються у корм для тварин або органічні добрива. Крім того, Південна Корея ввела систему оплати за харчові відходи, коли жителі платять за кількість відходів, які вони виробляють. Ця система стимулює населення до зменшення кількості харчових відходів та правильного їх сортування. У 2023 році харчові відходи зменшилися на 16%, з 440 тисяч тонн до 370 тисяч тонн. Розглянемо технічні деталі південнокорейської системи:

- Автоматизовані смітєві баки: у місті Сеул використовуються автоматизовані смітєві баки з радіочастотною ідентифікацією (RFID), які зважують харчові відходи та стягують плату за їх кількість. Це дозволяє зменшити кількість харчових відходів та підвищити ефективність їх переробки.
- Переробка харчових відходів: харчові відходи переробляються у біогаз та біо-нафту шляхом видалення вологи та подальшої переробки у органічні добрива.
- Урбаністичні ферми: у Південній Кореї активно розвиваються урбаністичні ферми, які використовують перероблені харчові відходи як добрива. Це дозволяє підвищити продуктивність сільського господарства та зменшити залежність від синтетичних добрив.

У Швеції особливу увагу приділяють відповідальності виробників за відходи. З 2024 року муніципалітети будуть відповідати за збір пакувальних відходів, але виробники залишаються відповідальними за їх переробку. Такий підхід стимулює виробників до розробки більш екологічних продуктів та зменшення кількості відходів.

Крім того, Швеція активно розвиває технології енергетичної переробки відходів, які дозволяють отримувати теплову та електричну енергію з відходів. Швеція імпортує відходи з інших країн для забезпечення роботи своїх енергетичних установок. Розглянемо технічні деталі шведської системи:

- Енергетична переробка: Швеція використовує передові технології енергетичної переробки відходів, які дозволяють отримувати теплову та електричну енергію з відходів. Ця енергія використовується для опалення будинків та виробництва електроенергії.
- Переробка металів: Швеція активно переробляє метали з попелу від енергетичних установок, що дозволяє зменшити кількість відходів та підвищити ефективність використання ресурсів.
- Автоматизовані сортувальні системи: Швеція використовує автоматизовані сортувальні системи, які дозволяють швидко та точно сортувати відходи за типами. Завод SITE ZERO у Швеції може обробляти 42 тонни пластику на годину та розділяти відходи на дванадцять фракцій.

У Сполучених Штатах Америки переробка відходів також є важливою складовою екологічної політики. Уряд країни розробляє Національну стратегію переробки, яка спрямована на покращення системи переробки та збільшення кількості перероблених відходів. Одним з ключових напрямків розвитку переробки в США є впровадження інноваційних технологій сортування та переробки відходів. У країні активно використовуються матеріалозберігаючі заводи, які дозволяють підвищити якість перероблених матеріалів та збільшити їх кількість. Розглянемо технічні деталі американської системи:

- Автоматизовані сортувальні системи: США активно впроваджують автоматизовані сортувальні системи, які використовують передові сенсори та штучний інтелект для швидкого та точного сортування відходів. Ці технології підвищують ефективність переробки та зменшують залежність від ручної праці.
- Хімічна переробка пластику: США розвивають технологію хімічної переробки пластику, яка дозволяє розбивати пластик на хімічні компоненти та використовувати їх для виробництва нових матеріалів.
- Переробка паперу: США активно переробляють папір у нову паперову продукцію, що зменшує потребу у деревині та енергії. У США близько 32% відходів переробляються, але планується збільшити цей показник до 50% до 2030 року.

Розглянемо детальніше технології та підходи, які дозволяють автоматизувати процес переробки побутових відходів:

1. Технології комп'ютерного зору у сортуванні. Комп'ютерний зір є однією з ключових технологій, що використовується для розпізнавання візуальних образів відходів на конвеєрі. Сучасні системи застосовують високоточні цифрові камери з роздільною здатністю від 2 до 20 мегапікселів, що дозволяє фіксувати деталі навіть на високій швидкості руху сміття. Алгоритми обробки зображень, зокрема методи сегментації, класифікації та детекції об'єктів, працюють у реальному часі, що дозволяє системам здійснювати сортування з точністю до 95–98 %. До прикладу, сучасні лінії сортування можуть опрацьовувати до 20 000 відходів за годину завдяки використанню багатоканальних систем обробки зображень та паралельної обробки даних. Розробки в галузі дозволяють впроваджувати системи з високою частотою кадрів (до 100 кадрів/секунду), що критично важливо для роботи на високошвидкісних конвеєрах. До того ж, застосування спеціалізованих графічних процесорів (GPU) забезпечує швидке виконання складних алгоритмів нейронних мереж, що покращує процес розпізнавання навіть для складних об'єктів з низькою контрастністю. У США та Європі вже існують сортувальні комплекси, де використання комп'ютерного зору дозволило зменшити процент помилок при сортуванні до 2–3 %. Такі системи використовуються як на центральних сортувальних станціях, так і у невеликих муніципальних центрах переробки відходів, що сприяє скороченню витрат на експлуатацію та підвищенню продуктивності підприємств.

2. Близня інфрачервона спектроскопія (NIR): принцип роботи та переваги. Дана технологія дозволяє визначати хімічний склад матеріалів за допомогою аналізу їх спектральних характеристик. Діапазон хвиль, що використовується – зазвичай від 780 до 2500 нм – дозволяє виявляти специфічні “відбитки” різних полімерів, паперу, скла та інших матеріалів. Точність визначення залежить від спектрального розділення сенсорів, яке часто становить 10–20 нм, та від потужності джерела світла, що забезпечує однорідне освітлення зразків. Основні переваги NIR-технологій включають:

- Швидкість аналізу: обробка сигналу займає менше мілісекунди, що дозволяє працювати в режимі реального часу.
- Висока точність: можливість розрізняти схожі матеріали завдяки аналізу спектральних даних.

- Невтручальність: сканування здійснюється без фізичного контакту з матеріалом, що дозволяє працювати у агресивних середовищах.

За даними деяких досліджень, системи, що використовують NIR, можуть досягати точності визначення матеріалів до 98 % при швидкості обробки понад 15 000 одиниць за годину. Наприклад, на сортувальному підприємстві в Нідерландах впровадження NIR-систем дозволило збільшити обсяг переробки пластикових відходів на 30 % при одночасному зниженні витрат на додаткове ручне сортування.

3. Штучний інтелект (AI) у розпізнаванні та сортуванні відходів. Штучний інтелект, зокрема алгоритми машинного навчання, використовуються для аналізу великих обсягів даних, отриманих від комп'ютерного зору та NIR-сенсорів. Глибокі нейронні мережі навчаються на тисячах прикладів, що дозволяє їм розпізнавати навіть незначні відмінності між типами відходів. Такі системи можуть постійно оновлювати свої алгоритми, адаптуючись до змін у складі відходів. Сучасні AI-системи для сортування мають наступні характеристики:

- Час навчання: від кількох годин до декількох днів, залежно від обсягу даних.
- Обчислювальна потужність: використання GPU та спеціалізованих серверів дозволяє обробляти до 10–15 млн зображень на добу.
- Точність класифікації: досягнення точності понад 97 %, що критично важливо для розрізнення схожих за кольором або текстурою матеріалів.

Дослідження, проведене компанією Wilts у 2021 показало, що інтеграція AI у сортувальні системи може спричинити зниження проценту помилок на 40 % порівняно з традиційними методами. У США застосування AI в окремих муніципалітетах дозволило збільшити ефективність переробки на 25 %, а також значно знизити витрати на експлуатацію автоматизованих систем.

Розглянемо приклади провідних автоматичних сортувальних комплексів:

1. TOMRA Sorting Solutions. Компанія TOMRA пропонує системи, що інтегрують комп'ютерний зір, NIR та AI. Їх рішення дозволяють досягати високої швидкості сортування – від 15 до 20 тисяч одиниць на годину, забезпечуючи при цьому точність розпізнавання матеріалів на рівні 97–99 %. TOMRA використовує інноваційні алгоритми, що дозволяють розпізнавати навіть невеликі частки домішок у матеріалах. На одному з європейських підприємств TOMRA впровадила систему, що скоротила витрати на ручну перевірку сортування на 50 %, а також збільшила обсяг перероблених матеріалів на 35 % завдяки більш точній класифікації сміття.

2. AMP Robotics. Дана компанія спеціалізується на застосуванні глибокого навчання для адаптивного сортування. Їх системи використовують спеціальні датчики, камери високої роздільної здатності та алгоритми обробки зображень, що забезпечують точність до 98 %. Система здатна адаптуватися до змін у складі відходів, оптимізуючи сортування в режимі реального часу. На одному з сортувальних підприємств у США впровадження систем AMP Robotics дозволило знизити відсоток помилок на 30 % та підвищити загальну продуктивність на 20 %. Завдяки інтеграції з існуючими виробничими процесами система може працювати без зупинок, забезпечуючи безперервний потік оброблених матеріалів.

3. ZenRobotics. Вони впроваджують роботизовані системи, які поєднують передові технології комп'ютерного зору та робототехніки. Їх роботи здатні ідентифікувати об'єкти завдяки використанню камер з високою роздільною здатністю та аналізувати дані за допомогою алгоритмів глибокого навчання. Завдяки модульній конструкції роботизованих систем, їх легко інтегрувати у вже існуючі 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. Деякі підприємства відзначають, що завдяки роботизованим системам скорочено час реагування на зміни у складі відходів до 70 %.

Незважаючи на значні успіхи, є низка викликів, з якою стикаються сучасні сортувальні системи. Розглянемо виклики та перспективи розвитку сортувальних технологій:

- Висока вартість впровадження: закупівля високотехнологічного обладнання, включаючи камери, NIR-сканери та сервери для AI, може коштувати від декількох сотень тисяч до мільйонів доларів залежно від масштабу системи.
- Інтеграція з існуючою інфраструктурою: у багатьох країнах існує застаріла система збору та переробки відходів, що ускладнює інтеграцію новітніх технологій без значних інвестицій у модернізацію.

- Потреба у спеціалістах: для обслуговування високотехнологічного обладнання необхідно мати кваліфікований персонал, що володіє знаннями в галузі робототехніки, програмування та аналізу даних.

До перспектив та майбутніх напрямків досліджень можна віднести наступні:

- Подальше вдосконалення AI: розробка нових алгоритмів, здатних працювати в умовах значної варіативності відходів, та інтеграція моделей навчання з підкріпленням.
- Інтеграція IoT: впровадження інтернету речей для моніторингу процесів у режимі реального часу дозволить оперативно реагувати на зміни в роботі сортувальних ліній.
- Розширення спектру застосування: розробка гібридних систем, що поєднують комп'ютерний зір, NIR та ультрафіолетове сканування, дозволить ще точніше визначати склад матеріалів.
- Інвестиції у відновлювальні технології: розробка систем, що не тільки сортують, але й попередньо обробляють відходи (наприклад, подрібнення, очищення), що підвищить ефективність вторинної переробки.

Висновки

Світовий досвід у сфері переробки побутових відходів демонструє різноманітність підходів та технологій, які можуть бути застосовані в різних країнах. Німеччина та Японія показують високий рівень ефективності у сортуванні та переробці відходів, тоді як Південна Корея успішно впроваджує систему оплати за харчові відходи.

Сучасні автоматизовані системи, побудовані на базі комп'ютерного зору, NIR та AI, є потужним інструментом для досягнення високої ефективності сортування. Системи TOMRA, AMP Robotics та ZenRobotics, що є лідерами у своїй сфері, підтверджують можливість досягнення точності понад 97 % та обробки до 20 000 одиниць відходів на годину. Завдяки застосуванню машинного навчання, інтеграції IoT та використанню мультисенсорних підходів, сучасні сортувальні комплекси здатні не лише оптимізувати процес розпізнавання матеріалів, але й суттєво знизити витрати на експлуатацію та сприяти збереженню довкілля.

Економічні показники свідчать, що автоматизація може знизити витрати на сортування до 30–45 %, а екологічний ефект – зменшити кількість відходів на звалищах та викиди парникових газів на десятки відсотків. Проте, попри значні успіхи, галузь стикається з викликами, пов'язаними з високою вартістю впровадження та необхідністю модернізації існуючої інфраструктури. Майбутні дослідження та інновації у напрямку штучного інтелекту, робототехніки та сенсорних технологій відкривають нові перспективи для подальшого розвитку цієї галузі.

Інтеграція автоматизованих систем у процеси переробки відходів є не тільки технологічно доцільною, але й економічно вигідною. Сучасні рішення дозволяють створити замкнене виробниче коло, де вторинна сировина використовується для виробництва нових продуктів, що сприяє сталому розвитку та збереженню ресурсів.

Для України стратегічним вектором розвитку має стати поетапне впровадження автоматизованих технологій сортування на основі комп'ютерного зору та AI у поєднанні з модернізацією інфраструктури та законодавчою підтримкою. Важливо орієнтуватися на створення замкнутих технологічних циклів, стимулювання розробок вітчизняних рішень і розширення міжсекторальної співпраці, що дозволить підвищити ресурсну ефективність і екологічну безпеку країни.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Recycling program [Електронний ресурс] // Borgen Magazine. – Режим доступу: <https://www.borgenmagazine.com/recycling-program/> – Дата доступу: 15.03.2025.
2. The Japanese way of recycling waste [Електронний ресурс] // Chemical & Engineering News. – Режим доступу: <https://cen.acs.org/environment/Japanese-way-recycling-waste/102/i22> – Дата доступу: 15.03.2025.
3. South Korea's approach to recycling food waste [Електронний ресурс] // World Economic Forum. – Режим доступу: <https://www.weforum.org/stories/2019/04/south-korea-recycling-food-waste/> – Дата доступу: 15.03.2025.

4. Swedish recycling is so successful it is importing rubbish [Електронний ресурс] // TRT World. – Режим доступу: <https://www.trtworld.com/europe/swedish-recycling-so-successful-it-is-importing-rubbish-24491> – Дата доступу: 15.03.2025.
5. US recycling system [Електронний ресурс] // United States Environmental Protection Agency (EPA). – Режим доступу: <https://www.epa.gov/circulareconomy/us-recycling-system> – Дата доступу: 15.03.2025.
6. Waste Management in Germany [Електронний ресурс] // Earth.Org. – Режим доступу: <https://earth.org/waste-management-germany/> – Дата доступу: 15.03.2025.
7. Germany Waste Management Market Report [Електронний ресурс] // Next Move Strategy Consulting. – Режим доступу: <https://www.nextmsc.com/report/germany-waste-management-market> – Дата доступу: 15.03.2025.
8. Korea's waste output falls for the first time in a decade [Електронний ресурс] // Korea JoongAng Daily. – Режим доступу: <https://koreajoongangdaily.joins.com/news/2025-02-02/national/environment/Koreas-waste-output-falls-for-first-time-in-a-decade/2233282> – Дата доступу: 15.03.2025.
9. Ultra-modern sorting technology for the circular economy [Електронний ресурс] // RecyclingInside. – Режим доступу: <https://recyclinginside.com/recycling-technology/separation-and-sorting-technology/ultra-modern-sorting-technology-for-the-circular-economy/> – Дата доступу: 15.03.2025.
10. Recycling innovations in the USA: How technology is revolutionizing the industry [Електронний ресурс] // SmartSort AI. – Режим доступу: <https://www.smartsortai.com/recycling-innovations-in-the-usa-how-technology-is-revolutionizing-the-industry/> – Дата доступу: 15.03.2025.
11. Financial Assessment of U.S. Recycling System Infrastructure [Електронний ресурс] // United States Environmental Protection Agency (EPA). – Режим доступу: https://www.epa.gov/system/files/documents/2024-12/financial_assessment_of_us_recycling_system_infrastructure.pdf – Дата доступу: 15.03.2025.
12. Wilts H., Riesco Garcia B., Guerra Garlito R., Saralegui Gómez L., González Prieto E. Artificial Intelligence in the Sorting of Municipal Waste as an Enabler of the Circular Economy. [Електронний ресурс]. – 2021. – Т. 10, № 4. – Режим доступу: <https://www.mdpi.com/2079-9276/10/4/28> (дата звернення: 01.02.2025).
13. TOMRA Sorting Solutions. Innovations in automated sorting. [Електронний ресурс]. – 2017. – Режим доступу: <https://www.tomra.com/en/sorting> (дата звернення: 08.02.2025).
14. AMP Robotics. AI-powered recycling: Case studies and technology overview. [Електронний ресурс]. – 2019. – Режим доступу: <https://www.amprobotics.com> (дата звернення: 08.02.2025).
15. ZenRobotics. ZenRobotics: Pioneering intelligent waste sorting. [Електронний ресурс]. – 2018. – Режим доступу: <https://zenrobotics.com> (дата звернення: 08.02.2025).

Моторний Анатолій Павлович – аспірант 174-ї спеціальності, факультет інтелектуальних інформаційних технологій та автоматизації, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця, e-mail: anatolii.motornyi@gmail.com

Науковий керівник: **Кабачій Владислав Володимирович** – канд. техн. наук, доцент кафедри автоматизації та інтелектуальних інформаційних технологій, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця, e-mail: kabachij.v.v@vntu.edu.ua

Motornyi Anatolii P. – Department of Intelligent Information Technology and Automation, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, e-mail: anatolii.motornyi@gmail.com

Supervisor: **Kabachii Vladyslav V.** – Cand. Sc. (Eng), Assistant Professor of Intelligent Information Technology and Automation0, VinnytsiaUp National Technical University, Vinnytsia, e-mail: kabachij.v.v@vntu.edu.ua