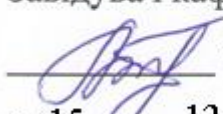


МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Національний університет кораблебудування
імені адмірала Макарова

Факультет економіки та екології моря

Кафедра екології та природоохоронних технологій

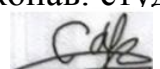
«Допущений до захисту»
Завідувач кафедри
 Трохименко Г.Г.
« 15 » 12 2025 р.

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

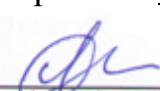
на здобуття ступеня вищої освіти «магістр»

на тему **«ОЦІНКА ЕФЕКТИВНОСТІ СУЧАСНИХ ТЕХНОЛОГІЙ
УТИЛІЗАЦІЇ ЕЛЕКТРОННИХ ВІДХОДІВ»**

Виконав: студент 6271м групи


(підпис) **Гребеник С.М.**

Керівник: к.е.н., доцент
(посада, науковий ступінь, вчене звання)


(підпис) **Літвак О.А.**

Миколаїв – 2025

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова

Факультет економіки та екології моря

Кафедра _____ екології та природоохоронних технологій

Спеціальність 101 Екологія

Освітня програма «Екологія та охорона навколишнього середовища»

«ЗАТВЕРДЖУЮ»
Гарант освітньої програми
д.б.н., професор
Наконечний І.В.

“ 15 ” 12 2025 року

ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ на здобуття ступеня вищої освіти «магістр»

Студенту _____ Гребенику Сергію Миколайовичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1.Тема роботи: «Оцінка ефективності сучасних технологій утилізації електронних відходів»

Керівник роботи Літвак Ольга Анатоліївна, канд. екон. наук, доцент

(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

Затверджені наказом ректора № 1314-УЧ від « 31 » жовтня 2025 року

2. Термін подання роботи: 10.12.2025 р.

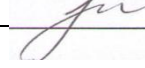
3. Вихідні дані по роботі: нормативно-законодавчі акти, методичні рекомендації, наукові публікації за темою дослідження.

4. Перелік питань, що належать до розробки (найменування розділів)

1. Проблеми накопичення електронних відходів. 2. Сучасні підходи до управління та поводження з електронними відходами. 3. Характеристика технологій переробки друкованих плат. 4. Оцінка ефективності технологій переробки друкованих плат. 5. Економічні аспекти управління електронними відходами. 6. Охорона праці

5. Перелік презентаційних матеріалів: Презентація – 22 слайда.

6. Консультанти розділів проекту (роботи)

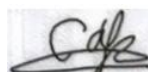
Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
5	Літвак О.А., к.е.н., доцент		
6	Маринець О.М., к.т.н., доцент		

7. Дата видачі завдання 03.09.2025 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

Номер	Назва етапів роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1	Вибір теми кваліфікаційної роботи	03.09.2025	
2	Визначення мети, завдань, об'єкта та предмета дослідження	10.09.2025	
3	Складання плану, підбір і опрацювання списку використаних джерел	17.09.2025	
4	Вивчення проблем накопичення електронних відходів	28.09.2025	
5	Аналіз сучасних підходів до управління та поводження з електронними відходами	14.10.2025	
6	Вивчення технологій переробки друкованих плат	20.10.2025	
7	Проведення оцінки ефективності технологій переробки друкованих плат	26.10.2025	
8	Аналіз економічних аспектів управління електронними відходами	15.11.2025	
9	Розробка заходів з охорони праці та техніки безпеки	25.11.2025	
10	Оформлення пояснювальної записки кваліфікаційної роботи	30.11.2025	
11	Підготовка до захисту кваліфікаційної роботи	10.12.2025	
12	Захист кваліфікаційної роботи	23.12.2025	

Студент



(підпис)

Гребеник С.М.

(прізвище та ініціали)

Керівник роботи



(підпис)

Літвак О.А.

(прізвище та ініціали)

Анотація
до кваліфікаційної роботи «Оцінка ефективності сучасних технологій
утилізації електронних відходів»
студента Гребеника Сергія Миколайовича

Кваліфікаційна робота присвячена порівняльному аналізу сучасних технологій утилізації електронних відходів з оцінюванням їх переваг і недоліків за критеріями екологічності, енергоефективності, ресурсозбереження та економічної доцільності. У роботі розглянуто поняття та класифікацію електронних відходів, масштаби їх накопичення, негативний вплив на довкілля, здоров'я населення та зміну клімату, а також сучасні підходи до управління електронними відходами. Особливу увагу приділено технологіям переробки відпрацьованих друкованих плат і проведено оцінку їх ефективності за ключовими показниками. Проаналізовано економічні аспекти управління електронними відходами та розглянуто питання охорони праці й техніки безпеки під час виконання робіт з переробки.

Кваліфікаційна робота складається зі вступу, шести розділів, висновків, списку використаних джерел. Основний зміст викладено на 103 сторінках комп'ютерного тексту, у тому числі 25 рисунків, 15 таблиць. Список використаних джерел складається із 74 найменувань.

Ключові слова: електронні відходи, утилізація, екологічна безпека, друковані плати, розширена відповідальність виробника, технології переробки друкованих плат.

Summary
to the qualification work «Assessment of the effectiveness of modern electronic
waste recycling technologies»
Hrebenyk Serhii

The qualification paper is devoted to a comparative analysis of modern technologies for electronic waste treatment, with an assessment of their advantages and disadvantages according to the criteria of environmental friendliness, energy efficiency, resource conservation, and economic feasibility. The paper examines the concept and classification of electronic waste, the scale of its accumulation, its negative impact on the environment, public health, and climate change, as well as current approaches to e-waste management. Special attention is paid to technologies for recycling waste printed circuit boards, and their effectiveness is evaluated using key indicators. The economic aspects of electronic waste management are analyzed, and occupational health and safety issues during recycling operations are also considered.

The qualification paper consists of an introduction, six chapters, conclusions, and a list of references. The main content is presented on 103 pages of computer-typed text, including 25 figures and 15 tables. The list of references contains 74 sources.

Keywords: electronic waste, treatment and disposal, environmental safety, printed circuit boards, extended producer responsibility, printed circuit board recycling technologies.

ЗМІСТ

ВСТУП	8
РОЗДІЛ 1 ПРОБЛЕМИ НАКОПИЧЕННЯ ЕЛЕКТРОННИХ ВІДХОДІВ	10
1.1 Поняття «електронні відходи»	10
1.2 Електронні відходи як екологічна проблема сучасного життя....	14
1.3 Негативний вплив електронних відходів на довкілля і стан здоров'я людини.....	19
1.4 Вплив електронних товарів та відходів на зміну клімату	26
РОЗДІЛ 2 СУЧАСНІ ПІДХОДИ ДО УПРАВЛІННЯ ТА ПОВОДЖЕННЯ З ЕЛЕКТРОННИМИ ВІДХОДАМИ.....	30
2.1 Сучасні підходи до управління та поводження з електронними відходами в країнах світу.....	30
2.2 Правові основи та стан поводження з електронними відходами в Україні	38
2.3 Основні аспекти та ключові етапи процесу переробки електронних відходів.....	43
2.4 Коротка характеристика існуючих методів переробки електронних відходів	47
РОЗДІЛ 3 ХАРАКТЕРИСТИКА ТЕХНОЛОГІЙ ПЕРЕРОБКИ ДРУКОВАНИХ ПЛАТ	54
3.1 Обґрунтування вибору виду електронного відходу для об'єкта дослідження.....	54
3.2 Типовий матеріальний склад друкованої плати та процес її демонтажу	55
3.3 Технології переробки друкованих плат	61
3.4 Переробка неметалевих фракцій друкованих плат	71
РОЗДІЛ 4 ОЦІНКА ЕФЕКТИВНОСТІ ТЕХНОЛОГІЙ ПЕРЕРОБКИ ДРУКОВАНИХ ПЛАТ	75
4.1 Критерії вибору технології переробки друкованих плат	75

4.2 Методика оцінки ефективності технологій	79
4.3 Результати оцінки ефективності технологій переробки відходів друкованих плат	81
РОЗДІЛ 5 ЕКОНОМІЧНІ АСПЕКТИ УПРАВЛІННЯ ЕЛЕКТРОННИМИ ВІДХОДАМИ	87
5.1 Забезпечення принципів циркулярної економіки під час управління та поводження з електронними відходами	87
5.2 Порівняння економічної ефективності досліджуваних технологій переробки друкованих плат	92
РОЗДІЛ 6 ОХОРОНА ПРАЦІ	95
6.1 Основні положення	95
6.2 Аналіз небезпечних та шкідливих виробничих факторів при демонтажу електронних та електричних приладів	97
6.3 Розрахунок системи освітлення виробничого приміщення з використанням світлодіодних ламп	98
6.4 Заходи техніки безпеки при демонтажу електронних та електричних приладів	99
ВИСНОВКИ	102
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	104

ВСТУП

Актуальність теми. У XXI столітті інформаційні та виробничі технології постійно розвиваються, на зміну застарілим впроваджуються нові електронні та електричні продукти, що мають очевидну перевагу в ціні, продуктивності та зовнішньому вигляді. Змінюється і сама концепція споживання. У зв'язку з підвищенням рівня життя людей, термін служби електронних продуктів скорочується, тим самим прискорюючи зростання електронних відходів. Ця динаміка сприяє збільшенню матеріальних потреб споживачів і прискоренню темпів урбанізації. Електронні продукти швидко стають популярними і щорічне споживання електроніки значно збільшується, а з урахуванням того, що щороку виробники намагаються здешевлювати виробництво і нарощують випуск дешевих пристроїв, ситуація стає ще гіршою.

Тим часом, кількість застарілої електроніки також зростає. Електронні відходи стали одним із найдинамічніше зростаючих потоків відходів у світі. Вони містять як цінні вторинні ресурси (золото, срібло, мідь), так і небезпечні речовини (свинець, ртуть, бромовані антипірени), що становлять серйозну загрозу для довкілля та здоров'я людей у разі неналежної утилізації. Згідно з даними Глобального моніторингового звіту ООН, обсяги електронних відходів зростають щороку на 2-3 млн тонн, тоді як рівень їх переробки залишається низьким. Більшість електронних відходів переробляються непрофесійними підприємствами, їх просто розбирають, а потім перепродують на вторинні ринки. В якості альтернативи дорогоцінні метали в електронних відходах витягують за допомогою низько технологічних і високо забруднених методів, таких як кислотне вибугоування і спалювання. Обидва ці способи утилізації можуть завдати серйозної шкоди навколишньому середовищу. Електронні відходи здатні спричинити справжню екологічну катастрофу.

Актуальним стає питання про теоретичні та практичні аспекти розширеної відповідальності виробників, систему перероблення та утилізації електронних відходів, а також витрати і вигоди на утилізацію електронних відходів у контексті реалізації принципів циркулярної економіки.

В Україні проблема електронних відходів лише загострюється через недосконалість нормативно-правової бази, недостатній рівень інфраструктури

для їх збирання та переробки, а також відсутність ефективного контролю за нелегальними потоками. Порівняння вітчизняного досвіду з провідними міжнародними практиками дозволяє виявити бар'єри та визначити можливості адаптації ефективних технологій переробки електронних відходів з урахуванням українських реалій. Таким чином, оцінка ефективності сучасних технологій утилізації електронних відходів є важливим кроком до формування екологічно безпечної та ресурсоефективної системи управління відходами в Україні.

Метою кваліфікаційної роботи є проведення порівняльного аналізу сучасних технологій утилізації електронних відходів, з визначенням їх переваг та недоліків за критеріями екологічності, енергоефективності, ресурсозбереження та економічної ефективності.

Завдання дослідження:

- проаналізувати поняття та класифікацію електронних відходів;
- дослідити масштаби накопичення електронних відходів та визначити їх роль, оцінити негативний вплив електронних відходів на довкілля, здоров'я населення та клімат;
- проаналізувати сучасні підходи до управління та поводження з електронними відходами;
- дослідити сучасні технології переробки відпрацьованих друкованих плат;
- провести оцінку ефективності технологій переробки відходів друкованих плат за критеріями екологічності, енергоефективності та ресурсозбереження;
- проаналізувати економічні аспекти управління електронними відходами;
- розглянути питання охорони праці та техніки безпеки.

Об'єкт дослідження – процеси утилізації електронних відходів як складова системи управління небезпечними та вторинними ресурсами.

Предмет дослідження – сучасні технології та методи утилізації електронних відходів, їх екологічна та ресурсна ефективність, а також практичне застосування.

РОЗДІЛ 1

ПРОБЛЕМИ НАКОПИЧЕННЯ ЕЛЕКТРОННИХ ВІДХОДІВ

1.1 Поняття «електронні відходи»

Науково-технічний прогрес став каталізатором різкого зростання електронної промисловості та пов'язаних із нею галузей. Однак ці процеси не тільки змінили глобальну сферу комунікацій і медіаконтенту, але й поставили перед суспільством проблему утилізації відпрацьованого, застарілого або несправного електронного обладнання. Бурхливе економічне зростання і збільшення чисельності населення в усіх країнах, укупі зі зниженням цін на електронну продукцію призвели до збільшення кількості таких пристроїв у населення.

Якщо 25 років тому мобільний телефон могли собі дозволити тільки забезпечені люди, то сьогодні без цього «гаджета», а разом і планшета, ноутбука або настільного комп'ютера, не обходиться практично жодна людина. Проблема ж полягає в тому, що процес зростання активних користувачів електронних пристроїв випередив за швидкістю впровадження сучасних і екологічно безпечних систем утилізації цих же пристроїв.

Так з'явилася категорія «електронні відходи» (електронне сміття) – найдинамічніша категорія відходів у сучасному світі. Під цим терміном розуміють електричні або електронні пристрої, а також їхні компоненти, які виводять з експлуатації та відправляють на звалище.

Єдиного трактування поняття «електронні відходи», яке б повністю розкривало його зміст, не існує не тільки в міжнародній правовій практиці, а й у національному законодавстві, де регіони самостійно вирішують, що розуміти під цим визначенням. Електронні компоненти містяться в обладнанні найрізноманітніших сфер діяльності та масштабів роботи. Однак найчастіше під електронними відходами розуміють відпрацьоване електротехнічне та електронне устаткування, що раніше функціонувало за низької напруги (не

більш як 1000 В для змінного струму, 1500 В – для постійного струму) (рис. 1.1).

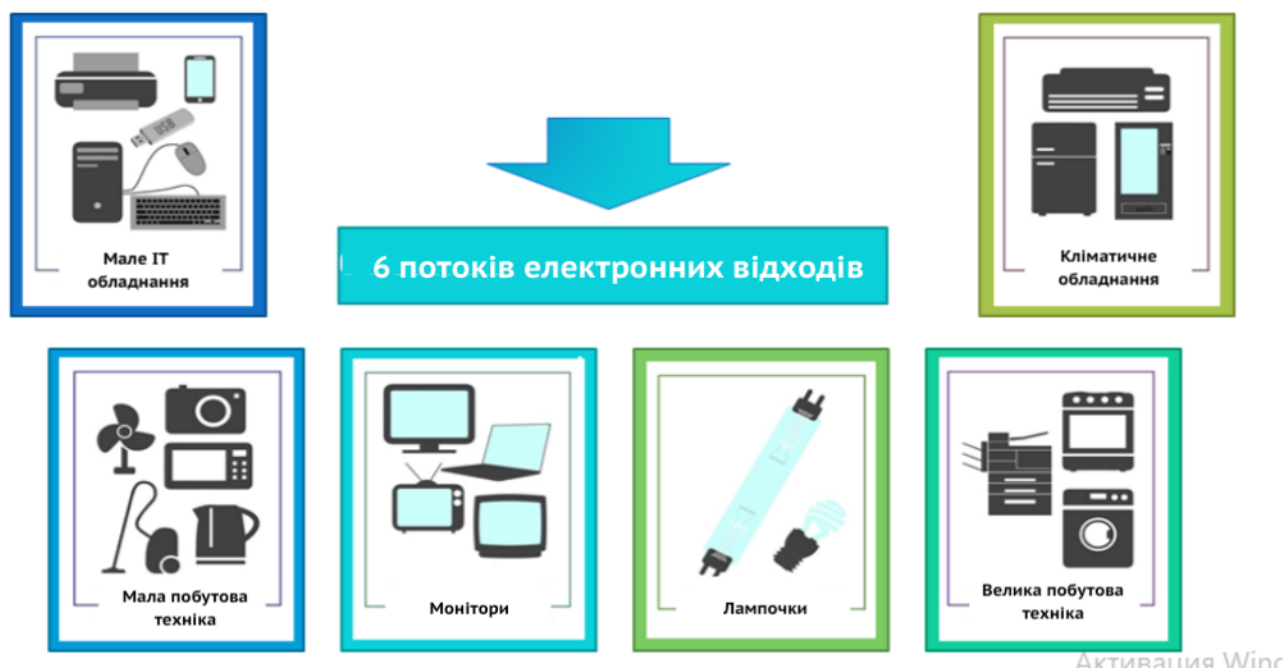


Рис. 1.1. Шість основних потоків електронних відходів

Таким чином, у широкому розумінні електронні відходи являють собою різні побутові, комп'ютерні або комунікаційні пристрої, як-от холодильники, пральні та посудомийні машини, телевізори та монітори, НВЧ-печі, комп'ютери, апарати для друку й копіювання та багато інших приладів, які вийшли з ладу або виявилися незатребуваними.

Найбільшу питому вагу в загальному обсязі електронних відходів має дрібне обладнання, включаючи мікрохвильові печі, пилососи, вентилятори, чайники, тостери, бритви, фени, радіоприймачі, інструменти та іграшки, на які припадає 32,9 % від загальної кількості зібраних електронних відходів. Відходи великогабаритного обладнання, включаючи пральні машини, сушильні машини, кухонні плити, духовки та посудомийні машини, становлять 24,3%. На відходи обладнання для обміну температурою, включаючи холодильники, морозильники, кондиціонери та теплові насоси, припадає 21,4%. Частка відходів екранів та моніторів, включаючи телевізори, монітори, ноутбуки, нетбуки та планшети, становить 9,5%. Відходи дрібного IT- та

телекомунікаційного обладнання, включаючи мобільні телефони, чохли для телефонів, бездротові маршрутизатори, клавіатури, електронні книги, GPS-навігатори та кишенькові калькулятори становлять – 7,9%. Відпрацьовані лампи (лампочки та світлодіоди) – 3,1%, фотоелектричні панелі – 0,9% (рис. 1.2). З усіх зазначених категорій відходів, екрани та монітори – єдині, виробництво яких скоротилося з 2014 року, і те лише тому, що старі, важчі монітори більше не випускаються.

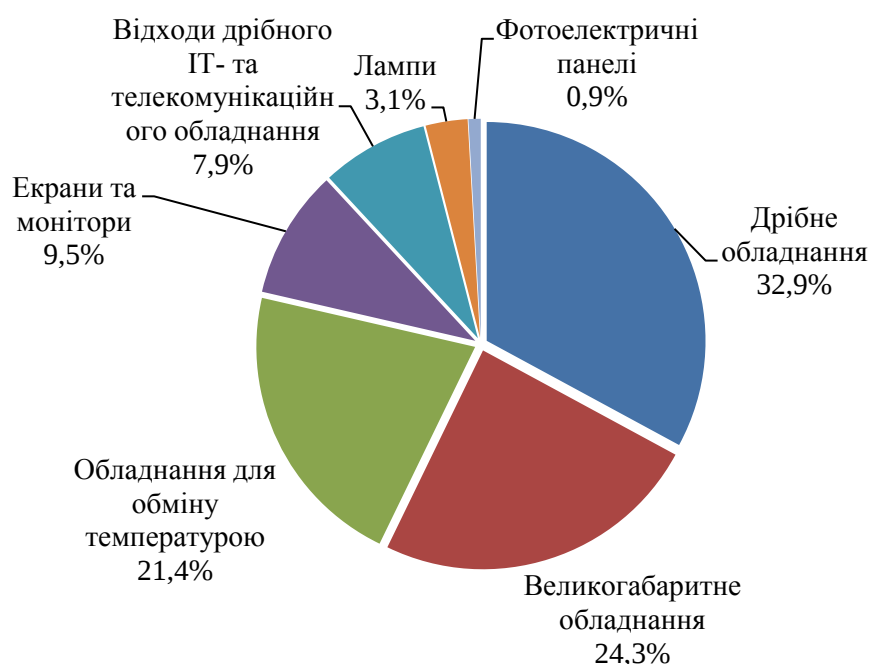


Рис. 1.2. Склад відходів електронного та електричного обладнання [68]

За видами електронні відходи поділяють на три групи:

- група 1 – металеві відходи, як правило, на основі міді та її сплавів із вмістом благородних металів до 5% (відходи прокатки, плакування і штампування, незапечатані в капсулах транзистори, масивні позолочені шайби, фольга, дроти);
- група 2 – дво- або багат шарові матеріали з кольорових металів або сплавів, які різними способами покривають тонким шаром благородних металів (із вмістом менше 5%);

- група 3 – матеріали, з'єднані з пластиком, керамікою, склом та іншими компонентами (транзистори, укладені в капсули з кремнійорганічних полімерів, плати з друкованим монтажем, частини комутаційних систем, струмопровідні та резистивні пасти на основі срібла, паладію і рутенію). З брухту радіотехнічних та електронних (побутових і військових) виробів при вторинній переробці витягують дорогоцінні метали. Це, насамперед, золото, срібло, платина і паладій.

За напрямками переробки електронні відходи можна умовно поділити на дві категорії:

1. Відходи з можливістю повторного використання після усунення несправностей. До цієї категорії належать пристрої, які вийшли з ладу і були замінені власниками на нові, проте не втратили своєї придатності в сучасних умовах.

2. Відходи, що підлягають переробці для вилучення вторинних ресурсів: матеріальних або енергетичних. До таких пристроїв можна віднести ті прилади, які зазнали ушкоджень, за яких їхній ремонт видається недоцільним, а також застарілі пристрої, що не становлять реальної цінності для сучасного суспільства (відеомагнітофони, факси, пейджери, плівкові фотоапарати тощо).

Вилучення матеріальних ресурсів може передбачати розбір на запасні частини для ремонту аналогічних пристроїв або особливу переробку для вилучення окремих речовин, наприклад, дорогоцінних або рідкоземельних металів. Сьогодні основною світовою проблемою стає не вихід приладів з ладу, а їхній вихід «з моди». Буквально щодня на ринку з'являються нові смартфони, ноутбуки, планшети та інші пристрої з іще просунутішими функціями, змушуючи користувачів змінювати їх дедалі швидше і швидше. У такій ситуації проблема утилізації електронних відходів стає все більш гострою.

1.2 Електронні відходи як екологічна проблема сучасного життя

Світ переживає значну електронізацію, в тому числі цифрову трансформацію, коли технології докорінно змінюють те, як ми живемо, працюємо, навчаємось, спілкуємось і ведемо бізнес. Багато людей володіють і користуються численними електронними пристроями, а зростаюча взаємопов'язаність міських і віддалених районів призвела до збільшення кількості пристроїв і об'єктів, підключених до Інтернету. Це зростання супроводжується різким збільшенням кількості електронного та електричного обладнання та відходів.

Постійний випуск провідними світовими компаніями все нових і нових пристроїв веде лише до збільшення цього обсягу. Особливістю сучасних електронних пристроїв є те, що внаслідок триваючого технічного прогресу, вони катастрофічно швидко застарівають «морально», «виходять з моди», стаючи непривабливими для власників. А це означає, що непотрібними стають не тільки зламані вироби, а й повністю працездатні пристрої, які могли функціонувати ще довгі роки.

Водночас глобальний рівень збору та переробки електронних відходів не встигає за цим зростанням. За даними Глобального моніторингу електронних відходів у 2022 році у світі утворилося 62 млн. тонн електронних відходів, або в середньому 7,8 кг на душу населення [68]. Лише 22,3% (13,8 млн. тонн) утворених електронних відходів було задокументовано як належним чином зібрані та перероблені. У 2010 році у світі було утворено 34 млн. тонн електронних відходів, і ця кількість щорічно зростала в середньому на 2,3 млн. тонн на рік (рис. 1.3).

Задокументований офіційний рівень збору та переробки також збільшився з 8 млн тонн у 2010 році в середньому на 0,5 млн тонн на рік. Таким чином, зростання утворення електронних відходів випереджає зростання офіційної переробки майже в 5 разів. У Звіті з Глобального моніторингу електронних відходів підкреслюється, що зростаюча кількість електронного та

електричного обладнання вперше продається в країнах, що розвиваються. Однак значна частина обладнання спочатку використовується в розвинених країнах і відправляється для подальшого використання через відносно нижчі ціни на пристрої.



Рис. 1.3. Обсяг утворення електронних відходів у світі та на душу населення [68]

Моніторинг обсягів та потоків електронних відходів має важливе значення для визначення того, якою мірою електроніка може допомогти зменшити вплив зміни клімату та мінімізації дефіциту ресурсів. З іншого боку, для того, щоб промисловість і політики могли по-справжньому використати позитивний потенціал циркулярної економіки в секторі електроніки, необхідні достовірні дані. сектору електроніки, які повинні бути у вільному доступі для прийняття рішень.

Електронні відходи, утворені у 2022 році, містили 31 млрд кг металів, 17 млрд кг пластику та 14 млрд кг інших матеріалів (мінерали, скло, композитні матеріали тощо) (рис. 1.4).

**62 млн тонн електронних відходів утворено у світі
у 2022 р.**

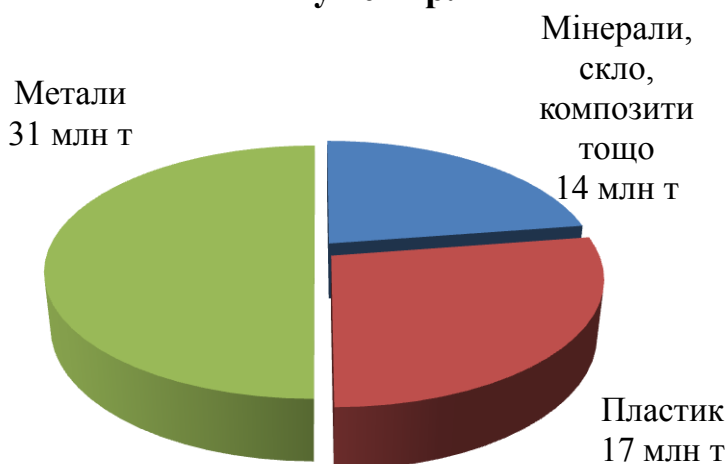


Рис. 1.4. Кількісний і компонентний склад електронних відходів, утворених у 2022 р. в країнах світу

За оцінками, 19 млн тонн електронних відходів, в основному з таких металів, як залізо, яке присутнє у великих кількостях і має високі показники переробки майже на всіх маршрутах поводження з електронними відходами, були перетворені на вторинні ресурси. Метали платинової групи та дорогоцінні метали були одними з найцінніших металів, але присутні у значно менших кількостях. Тим не менше, приблизно за оцінками, 300 тонн було перетворено на вторинні ресурси через офіційні та неофіційні практики переробки.

Частка патентних заявок у сфері поводження з електронними відходами зросла зі 148 мільйонів у 2010 року до 787 мільйонів у 2022 році. Більшість з цих заявок були пов'язані з технологіями переробки кабелів, при цьому майже не було ознак збільшення кількості патентів, поданих на технології, пов'язані з видобутком критично важливої сировини. Хоча рідкоземельні елементи мають унікальні властивості, які мають вирішальне значення для майбутніх технологій, включаючи відновлювану енергетику та електронну мобільність, переробка таких елементів залишається економічно складним завданням. Як наслідок, діяльність з переробки рідкоземельних елементів займає лише близько 1 % поточного попиту на переробку таких елементів. Ринкова ціна на

рідкоземельні елементи все ще занадто низька, щоб підтримувати великомасштабні комерційні операції з переробки.

Задокументовані офіційні показники збору та переробки відходів значно відрізняються в різних регіонах, а в Європі цей показник становить 42,8% (рис. 1.4). Країни Океанії займають друге місце – 41,4%. Переробка електронних відходів в США становить 30%. В Азії цей показник становить лише 11,8%. Найнижчий рівень збирання та переробки відходів в Африці – всього 0,7%.

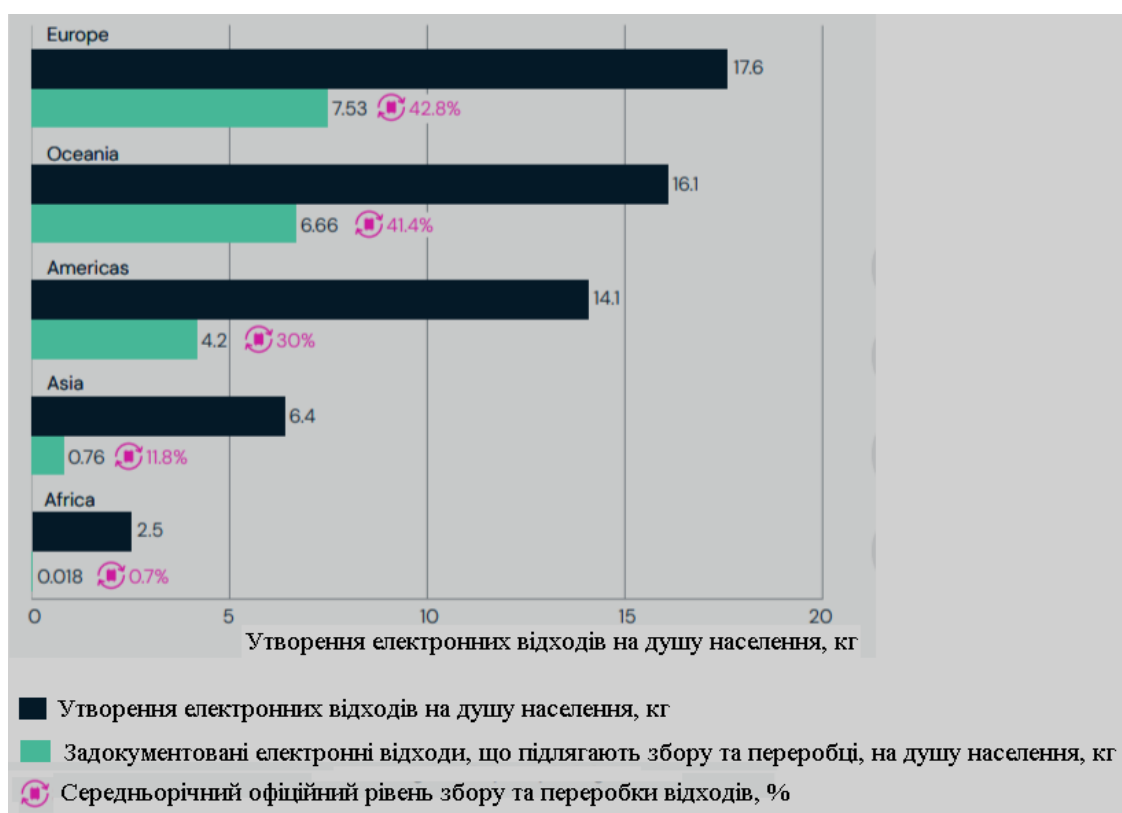


Рис. 1.5. Розподіл кількості утворених та зібраних електронних відходів за регіонами світу у 2022 році [68]

Тим не менш, держави-члени ЄС мають незначний прогрес в досягненні власних юридично зобов'язуючих цілей зі збору відходів. В Африканських країнах рівень переробки становить менше 1%. Країни Азії виробляють майже половину світового обсягу електронних відходів (30 млн тонн), але досягли обмеженого прогресу в управлінні електронними відходами; до того ж відносно

небагато з них прийняли законодавство або встановили чіткі цілі щодо збору електронних відходів.

За даними звіту Міжнародної спілки електрозв'язку (ITU) і Навчального та науково-дослідного інституту ООН (UNITAR) [69], 62 мільйони тонн електронних відходів, вироблених 2022 року, заповнять 1,55 мільйона 40-тонних вантажівок, що приблизно дорівнює кількості вантажівок, здатних вишикуватися в лінію, що оперізує екватор.

Найбільше електронних відходів виробляють Китай, США та Індія. У табл. 1.2 подано 10 країн-лідерів за обсягом виробництва електронних відходів. Для кожної країни з першої десятки також в таблиці наведено індивідуальний коефіцієнт переробки відходів відповідно до останніх даних [64].

Таблиця 1.1. 10 країн-лідерів за обсягом виробництва електронних відходів

№	Країна	Вироблено електронних відходів, тис. тонн	Коефіцієнт переробки
1	Китай	10129	16%
2	США	6918	15%
3	Індія	3230	1%
4	Японія	2569	22%
5	Бразилія	2143	0
6	Росія	1631	6%
7	Індонезія	1618	н/д
8	Німеччина	1607	52%
9	Велика Британія	1598	57%
10	Франція	1362	56%

У всьому світі щорічне виробництво електронних відходів збільшується на 2,6 млн тонн і до 2030 року може досягти 82 млн тонн, що на 33% більше за показник 2022 року.

Таким чином, електронні відходи стають найбільш швидко зростаючим потоком не тільки промислових, а й побутових відходів, в основному внаслідок

збільшення темпів споживання електричного та електронного обладнання, скорочення термінів служби та фактичної відсутності можливості ремонту.

1.3 Негативний вплив електронних відходів на довкілля і стан здоров'я людини

В останні десятиліття людство стикається з новою екологічною проблемою – зростанням обсягів електронних відходів, до яких відносяться застарілі електронні пристрої, які вийшли з ладу або вийшли з ладу: мобільні телефони, комп'ютери, телевізори, побутова техніка та інше. Однак крім екологічної шкоди, електронні відходи становлять серйозну загрозу для здоров'я людини (рис. 1.6).



Рис. 1.6. Вплив електронних відходів на стан навколишнього середовища

Тому переробка електронних відходів без використання спеціальних технологічних процедур і обладнання може призвести до несприятливих наслідків для здоров'я людини та забруднення довкілля, не кажучи вже про просте складування їх на сміттєзвалищах або утилізацію шляхом спалювання.

Потрапляння значного обсягу неперероблених електронних відходів на сміттєві полігони загального користування тягне за собою накопичення перерахованих вище шкідливих речовин у природному середовищі (повітрі, воді, ґрунті, рослинах). Їх подальше потрапляння в організм людини або тварин чинить негативний вплив на життя і здоров'я живих істот, а отже, становить загрозу екологічній безпеці. Дослідження підтверджують, що близько 40 % важких металів, включно зі свинцем, ртуттю і кадмієм, які виявляють у навколишньому середовищі, – це результат потрапляння на звалища електронного сміття.

Електронні відходи, незважаючи на начебто невелику частку в загальному обсязі твердих побутових відходів, вкрай небезпечні для людини. Близько 70% електронного сміття містять потенційно небезпечні матеріали, такі як: свинець, ртуть, берилій, кадмій, бромовані анпіірені, поліхлоровані біфеніли та інші. Ці речовини, потрапляючи в навколишнє середовище при неправильній утилізації електронних відходів, легко розповсюджуються по повітрю, воді та ґрунту, тим самим створюючи загрозу для здоров'я людей.

У табл. 1.2 представлено опис негативної дії деяких токсичних речовин, що містяться у відходах електротехнічного обладнання, на організм людини. Відомо, що всі важкі метали мають схильність до біоаккумуляції, внаслідок чого багаторазово посилюється їхня здатність вражати життєво важливі системи людського організму, збільшується ризик онкологічних захворювань пошкодження репродуктивної функції, дефектів дитячого розвитку тощо.

Таблиця 1.2. Вплив деяких токсичних речовин на організм людини

Речовина	Вміст в елементах електроніки	Вплив на здоров'я людини
Свинець	Припій, покриття контактних майданчиків друкованих плат і покриття виводів електронних	Зміна репродуктивної, нервової, серцево-судинної, імунної та ендокринної систем. Його токсична дія проявляється у змінах функціонального стану нирок, синтезу гемоглобіну, процесів окислювального метаболізму та енергетичного обміну. Викликає

	компонентів	заміщення кальцію в кістковій тканині; порушення росту та розвитку дітей.
Берилій	Комп'ютерна техніка	Спричиняє бериліоз, за якого внаслідок низки аутоімунних процесів під впливом берилію специфічно змінюються власні білки організму. Берилій порушує активність низки ферментів, впливає на метаболізм магнію в організмі людини.
Ртуть	Лампи, напівпровідники	Викликає серйозні порушення в роботі внутрішніх органів і систем в організмі людини. Ртуть відносять до класу небезпечних кумулятивних отрут, які чинять на організм цілу низку негативних впливів - частина з них формується одразу в гострий реактивний період отруєння, решта ж наслідків мають середньострокову і довгострокову основу
Кадмій	Батареї, напівпровідники, флюс	Токсичний вплив кадмію ґрунтується на блокуванні сірковмісних амінокислот (цистеїн, метіонін, глутатіон), що призводить до порушення білкового обміну та ураження ядра клітини. Кадмій сприяє виведенню кальцію з кісток і вражає нервову систему. Може накопичуватися в нирках і печінці. Дуже повільно виводиться з організму.
Азбест	Електричні нагрівальні прилади, плити для кабельних мостів	Спричиняє такі специфічні захворювання, як: азбетоз, рак легенів, мезотеліома плеври або очеревини. Накопичення ртуті в організмі людини сприяє розвитку алергічних реакцій, порушенню мозкової діяльності, погіршенню зору, катаракти, сліпоти, ослабленню імунної системи, депресивних станів, ураженню нирок, тератогенних ефектів.
Бромовані антипірени	Застосовуються для зниження займистості пластику	Мають канцерогенні властивості
Поліхлорированні біфеніли (ПХБ)	Часто присутні в конденсаторах і трансформаторах	Можуть спричиняти гормональні збої
Літій	Літієві, літій-іонні та літійполімерні акумулятори	Має пожежонебезпечні властивості

Найнебезпечніші ситуації виникають у місцях неофіційної переробки електронних відходів, де відсутні захисні технології. Люди, які проживають або працюють у таких районах, піддаються таким видам впливу:

- вдихання токсичних парів при спалюванні дротів і пластику для вилучення металів;
- поглинання токсинів через шкіру під час розбирання пристроїв без захисних засобів;
- вживання забрудненої води або їжі, вирощеної на забрудненому ґрунті.

Найбільш уразливими групами населення є діти, люди похилого віку та працівники переробних підприємств.

Накопичення токсичних речовин в організмі може призвести до різних захворювань:

- порушення в роботі нервової системи (особливо в дітей);
- ураження печінки та нирок;
- репродуктивні розлади;
- онкологічні захворювання;
- ослаблення імунної системи.

Довгостроковий вплив електронних відходів може проявлятися через кілька років після контакту, що ускладнює діагностику та лікування.

Для зниження негативного впливу електронних відходів необхідні такі заходи:

1. Розвиток системи безпечної утилізації та переробки електронних відходів;
2. Посилення контролю за вивезенням і захороненням е-відходів;
3. Створення стимулів для виробників розробляти більш екологічні та легко перероблювані пристрої;
4. Інформування населення про шкоду електронних відходів і способи їх безпечної утилізації;
5. Розвиток програм з повторного використання та ремонту електронної техніки.

Проблема електронних відходів – це не тільки екологічний, а й серйозний медичний виклик сучасності. Безвідповідальне поводження з такими відходами призводить до серйозних наслідків для здоров'я мільйонів людей по всьому світу. Лише скоординовані дії держав, виробників і суспільства зможуть мінімізувати загрозу та забезпечити сталий розвиток в умовах цифрової епохи. З огляду на велике розмаїття отруйних речовин у відходах електроніки, необхідне розроблення таких способів перероблення, які б істотно мінімізували їхній ступінь небезпеки для всіх живих організмів.

Ще одна важлива причина впровадження ефективної, продуманої системи утилізації відпрацьованої електронної техніки – переробка дорогоцінних, рідкісноземельних та інших корисних металів, що містяться в цих видах пристроїв. Завдяки певним фізико-хімічним властивостям зазначені метали широко застосовуються під час виробництва різної електронної техніки (побутова техніка, комп'ютери, ноутбуки, мобільні телефони, ігрові приставки, датчики та багато іншого). Отже електронні відходи містять багато цінних матеріалів, які можуть бути відновлені шляхом переробки (табл. 1.3).

При цьому сьогодні багато видів електронних відходів не переробляються належним чином або не переробляються зовсім, потрапляючи на звичайні сміттєзвалища, а отже, безліч таких цінних металів, як золото, срібло, мідь, платина, паладій, іридій, літій та ін., просто випадають із виробничого циклу, губляться.

У зв'язку з цим, Університет Організації Об'єднаних Націй (УООН) як найкращий напрямок роботи в цій сфері, розглядає контрольоване вилучення електронних відходів у населення, із залученням до зазначеного процесу виробників і продавців електроніки, а також систему місцевої та регіональної влади. Крім цього, у більшості європейських країн діють різні заходи, що підвищують ефективність утилізації електронних відходів. Так, наприклад, у Німеччині надзвичайно розвинена система роздільного збору сміття, що дає змогу унеможливити потрапляння електронних пристроїв у відходи іншого виду.

Таблиця 1.3. Матеріали, які можна вилучити з електронних відходів

Тип матеріалу	Матеріал	Де використовується (міститься)
Метали		
Дорогоцінні метали	Золото (Au)	Використовується в роз'ємах, перемикачах та друкованих платах
	Срібло (Ag)	Зустрічається у припої, перемикачах та друкованих платах.
	Платина (Pt) і паладій (Pd)	Використовується в роз'ємах та деяких електронних компонентах.
Чорні та кольорові метали	Сталь (Fe)	Використовується в структурних компонентах та корпусах.
	Мідь (Cu)	Широко використовується у проводці, друкованих платах та інших компонентах
	Алюміній (Al)	Знаходиться в корпусах, радіаторах та деяких електронних компонентах.
	Нікель (Ni)	Використовується в батареях та деяких електронних компонентах.
	Свинець (Pb)	Раніше часто використовувався у припоях, тепер рідше трапляється у зв'язку з нормативними вимогами.
	Цинк (Zn)	Використовується в деяких сплавах та компонентах.
	Олово (Sn)	Часто зустрічається у припоях.
Неметалічні матеріали		
Пластмаси	Види: ABS, полікарбонат та ПВХ.	Використовується в корпусах, компонентах та ізоляції
Скло	-	Зустрічається в екранах, моніторах та деяких електронних компонентах
Скловолокно та епоксидна смола	-	Використовується у друкованих платах для забезпечення структурної цілісності та ізоляції.
Рідкоземельні елементи		
Рідкоземельні елементи	Неодим (Nd)	Використовується у сильних постійних магнітах, які можна знайти у жорстких дисках та колонках
	Іттрій (Y), європій (Eu) та тербій (Tb)	Використовується в люмінофорах для екранів та дисплеїв.
	Лантан (La) та Церій (Ce)	Зустрічається в деяких типах батарейок та освітлювальних приладів.
Небезпечні матеріали		
Небезпечні речовини та сполуки	Ртуть (Hg):	Використовується в деяких старих типах вимикачів, реле та освітлювальних приладів.
	Кадмій (Cd)	Зустрічається в деяких батареях та старих типах електроніки.
	Бромовані антипірени (BFR)	Використовується в пластмасах та ПХБ для зниження горючості.

У Франції в ціну електронних пристроїв від початку закладено вартість утилізаційного збору, який дає змогу виробникам переробляти застарілу техніку. А в більшості італійських міст муніципальні служби безплатно вивозять стару електронну та побутову техніку, відправляючи її на переробку. І все ж не можна не відзначити, що навіть такий високий рівень відповідальності не заважає тому, що в деяких країнах Європи і, особливо, в США, процвітають і нелегальні схеми поводження з електронними відходами. Старі електронні пристрої буквально зникають з офіційних шляхів переробки, з'являючись потім на «чорному ринку» країн третього світу, де працюють тисячі людей. Масштаб цього нелегального бізнесу колосальний, а такі країни, як Гана, Нігерія, Пакистан, Індія та інші, поступово перетворюються на справжні звалища електронного сміття, яким заповнені величезні території. Електронні продукти та їхні компоненти, що руйнуються на звалищах, стають джерелами різноманітних хімічних сполук, що надходять у довкілля, включно з розчинами хлорованих речовин, бромовмісткими гасителями полум'я, полівінілхлоридами, важкими металами, пластиками. Під час спалювання відходів на відкритих полігонах виникає особлива проблема утворення токсичних продуктів горіння - діоксинів, що є смертельно небезпечними речовинами.

Яскравим символом екологічної катастрофи стало найбільше у світі звалище електронних відходів у м. Агбогблоші, неподалік столиці Гани, куди щороку звозять понад дві тисячі тонн електронного сміття зі США та країн Західної Європи. Тут із застарілих електронних відходів кустарними способами витягують частину цінних матеріалів, а решту компонентів просто спалюють. Отруйні речовини, що утворюються під час горіння електронних приладів, спричиняють важкі шкірні та серцеві захворювання, хвороби органів дихання. Усе це відбувається без будь-якого контролю та нагляду, тому все це негативно позначається на стані довкілля регіону.

1.4 Вплив електронних товарів та відходів на зміну клімату

Варто також розглянути вплив електронних товарів на зміну клімату. Кожен із коли-небудь створених пристроїв має вуглецевий слід і сприяє глобальному потеплінню, пов'язаному з життєдіяльністю людини. Виробництво тонни ноутбуків потенційно веде до утворення 10 тонн CO₂. Якщо розглядати викид вуглекислого газу протягом терміну служби пристрою, виявиться, що він відбувається в основному під час виробництва, перш ніж споживачі придбають продукт. Це робить процеси зі зниженням утворення CO₂ і споживанням вуглецю на стадії виробництва (як-от використання переробленої сировини) ключовими факторами, що визначають загальний вплив на довкілля протягом терміну служби продукту.

Хоча електронні відходи найчастіше асоціюються з токсичним забрудненням довкілля, дедалі більше досліджень підтверджують їхній вагомий внесок у зміну клімату. Цей вплив проявляється як прямо, через викиди парникових газів у процесах спалювання, розкладання та несанкціонованої утилізації електронних відходів, так і опосередковано – через втрату ресурсів, які могли б бути повторно використані чи перероблені з меншим енергетичним слідом.

Парникові гази під час спалювання електронних відходів. Один із найбільш шкідливих шляхів поводження з електронними відходами – їх неконтрольоване спалювання, яке практикується в багатьох країнах, зокрема і в Україні. Спалювання пластикових корпусів, кабелів та ізоляційних матеріалів призводить до викидів не тільки токсичних речовин (діоксини, фурани, важкі метали), але й значної кількості CO₂ та N₂O. Наприклад, 1 тонна пластикових компонентів, що містяться в електроніці, при спалюванні може генерувати понад 2,9 тонни CO₂-еквіваленту, що робить цей процес істотною складовою загального вуглецевого сліду електронних відходів.

Втрата ресурсів та збільшення «прихованих» викидів. Електронне обладнання містить значну кількість металів – міді, алюмінію, золота,

рідкоземельних елементів. Виробництво цих матеріалів із первинної сировини є надзвичайно енергоємним і супроводжується великими викидами парникових газів. Якщо ці ресурси не вилучаються з електронних відходів і не повертаються у виробничий цикл, економіка змушена добувати нову сировину, що лише підсилює вуглецеве навантаження.

Наприклад, виробництво 1 тонни первинної міді супроводжується викидами близько 3,5 тонн CO₂, тоді як переробка металу з електронних відходів може зменшити ці викиди на 60–90%. Таким чином, неефективна або відсутня переробка електроніки спричиняє «приховані» втрати кліматичних переваг, які могли б бути досягнуті шляхом повторного використання вторинних ресурсів.

Проблема фреонів і парникових газів з техніки. Деякі категорії електронних відходів, зокрема холодильники, кондиціонери, теплові насоси, містять фреони (наприклад, R-22, R-134a), які мають глобальний потенціал потепління (GWP) у сотні або тисячі разів вищий за CO₂. Неналежна утилізація такої техніки часто призводить до витоку цих речовин у атмосферу. Згідно з оцінками Міжнародного енергетичного агентства (IEA), витік одного кілограма R-134a має такий самий парниковий ефект, як викид 1300 кг CO₂ [33]. У 2019 році викиди CO₂ в еквіваленті від викинутих холодильників та кондиціонерів становили близько 0,3% від загального обсягу світових викидів, пов'язаних з енергетикою.

Цифровізація, споживання та кліматичний слід. Зростаюча кількість електронних пристроїв у побуті, бізнесі та промисловості – від смартфонів до серверів – створює не лише постійний потік відходів, а й суттєве навантаження на енергетичну систему. Заміна техніки кожні кілька років без належної утилізації підсилює кліматичний ефект: чим частіше пристрої стають відходами, тим більшим стає цикл виробництва, логістики і споживання енергії.

Кліматичні ризики від несанкціонованих полігонів. Накопичення електронних відходів на стихійних звалищах або відкритих майданчиках призводить до виділення метану, а також до локального підвищення

температури внаслідок займання, самозаймання або термічної деструкції. Ці процеси є неконтрольованими джерелами парникових газів та шкідливих аерозолів, що погіршують мікроклімат, особливо в міських районах.

На основі проведеного аналізу наукових джерел [27, 45, 58, 69, 61, 73] побудовано графік порівняння викидів вуглекислого газу на одну тонну електронних відходів залежно від способу їх утилізації (рис. 1.7). Ці дані підкреслюють важливість пріоритезації рециклінгу та продовження життєвого циклу електроніки як ключових інструментів кліматичної політики у сфері управління електронними відходами.

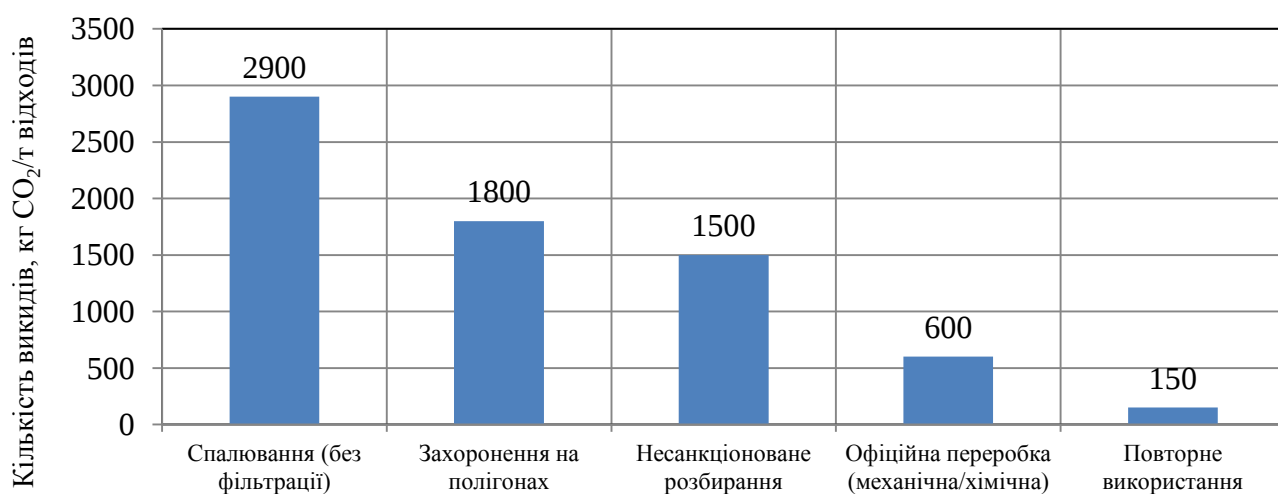


Рис. 1.7. Порівняння викидів CO₂ на одну тонну електронних відходів залежно від способу їх утилізації

Найвищі викиди вуглекислого газу спостерігаються при спалюванні без фільтрації (до 2900 кг CO₂/т). Значні обсяги викидів виникають при захороненні на полігонах – 1800 кг CO₂/т і несанкціонованому розбиранні відпрацьованої електронної та електричної техніки (низький рівень переробки, логістика, витік холодагентів) – 1500 кг CO₂/т. Офіційна переробка дає змогу зменшити викиди до 600 кг CO₂/т. Повторне використання електронних відходів – найефективніший з точки зору кліматичних ризиків підхід: лише 150 кг CO₂/т, з урахуванням транспортування та підготовки до повторного використання.

Таким чином, електронні відходи мають багатогранний і часто недооцінений вплив на кліматичну систему. Від спалювання й утрати вторинних ресурсів до викидів фреонів і збільшення загального обсягу вуглецевого сліду – неправильне поводження з електронними відходами значною мірою сприяє зміні клімату. У цьому контексті ефективне управління електронними відходами, розвиток системи переробки та регулювання викидів з утилізаційних процесів повинні розглядатися не лише як кроки до охорони довкілля, а і як інструменти кліматичної політики.

РОЗДІЛ 2

СУЧАСНІ ПІДХОДИ ДО УПРАВЛІННЯ ТА ПОВОДЖЕННЯ З ЕЛЕКТРОННИМИ ВІДХОДАМИ

2.1 Сучасні підходи до управління та поводження з електронними відходами в країнах світу

До цілей політики управління електронними відходами належить розв'язання важливих завдань у галузі захисту довкілля та мінімізації негативного впливу інформаційно-комунікативних технологій на здоров'я населення, у тому числі:

- утилізація небезпечних фракцій екологічно безпечним способом;
- максимальне відновлення цінного матеріалу (наприклад, металів і сплавів);
- створення екологічно ефективних і стійких підприємницьких структур;
- оцінка соціальної ефективності на місцевому рівні. Інноваційний критерій технологій переробки електронних відходів можна оцінювати з погляду економічних, екологічних та соціальних ефектів.

Згідно зі світовим досвідом існують такі етапи ефективного управління поводженням з електронними відходами:

- 1) збір електронних відходів, що включає в себе побутовий збір, муніципальний збір і збір промисловими підприємствами;
- 2) консолідація відходів – їх накопичення в місцях зберігання;
- 3) розбирання та перероблення електронних відходів, включно з розбором за видом і компонентами відходів;
- 4) вилучення вторинних матеріалів, що становлять інтерес для виробництва;
- 5) повернення витягнутих матеріалів у виробництво (повторне використання);

б) максимально безпечно для довкілля і здоров'я людей захоронення (або знищення) того обсягу електронних відходів, який не може бути перероблений.

На жаль, незважаючи на наявність чималої кількості підходів і пропозицій по боротьбі з електронним сміттям, сьогодні у світі існують поодинокі приклади побудови повноцінної системи ефективної утилізації електронних відходів та одержання з них цінних вторинних ресурсів, включно з благородними та рідкісноземельними металами.

На законодавчому рівні в більшості країн Європейського Союзу робота також триває досить давно. Так, ще у 2003 р. було ухвалено Директиви ЄС, які:

- Директива ЄС (Directive 2002/95/EC) «Про обмеження використання деяких небезпечних речовин в електричному та електронному устаткуванні», яка встановлює ліміти на використання низки токсичних матеріалів у виробництві електричного та електронного устаткування, що є екологічно обґрунтованим, оскільки мінімізується антропогенний вплив на навколишнє середовище під час перероблення та кінцевого захоронення електронних відходів. Крім того, директива стимулює виробництво екологічних товарів, оскільки компанії, що випускають електричне та електронне обладнання з метою його реалізації на європейських ринках, змушені виробляти його, дотримуючись вимог цієї директиви [37];

- Директива ЄС (Directive 2002/96/EC) «Про відходи електричного та електронного обладнання», яка зобов'язує виробників, дилерів та імпортерів електричного та електронного обладнання приймати відпрацьовану техніку з метою її переробки та рециклінгу. Згідно з цією Директивою ЄС 10 категорій такого обладнання [36]:

- велика побутова техніка;
- дрібна побутова техніка;
- ІТ і телекомунікаційне обладнання;
- споживче обладнання;
- освітлювальне обладнання;

- електричні та електронні інструменти (за винятком великих стаціонарних промислових інструментів);
- іграшки, товари для дозвілля та спортивні товари;
- медичні пристрої (за винятком усіх імплантованих та інфікованих пристроїв);
- інструменти здійснення моніторингу та контролю;
- розливні автомати.

Найважливіше значення для впровадження ефективних механізмів утилізації електронних відходів має глобальна підтримка цієї ініціативи з боку впливових міжнародних організацій. Так, у 2018 р. на Всесвітньому саміті з питань інформаційного суспільства було створено Коаліцію установ, що працюють під егідою ООН з питань боротьби з електронними відходами. Сьогодні до цієї Коаліції входять: ЮНЕП, Міжнародна організація праці (МОП), Всесвітня організація охорони здоров'я (ВООЗ), Міжнародний союз електрозв'язку (МСЕ), Організація Об'єднаних Націй з промислового розвитку (ЮНІДО) та інші міжнародні інституції. У рамках Коаліції працюють програми зі збору глобальної статистики електронних відходів (GESP6), впровадження міжнародних стандартів електронних технологій, контроль за безпечним поводженням з відходами тощо.

Сьогодні в більшості розвинених країн світу найпоширенішою концепцією управління електронними відходами є практика розширення сфер відповідальності виробників електроніки (Extended Producer Responsibility – EPR). Вона охоплює всі основні принципи концепції сталого розвитку і враховує як сучасні тенденції науково-технічного прогресу, що характеризуються зростанням кількості електронних пристроїв, так і необхідність захисту довкілля від обсягу електронних відходів, який безперервно збільшується.

Термін «Розширення сфер відповідальності виробників» був визначений шведським дослідником Ліндквіст Т. [56] у доповіді Міністерству екології та природних ресурсів Швеції так: « це стратегія захисту довкілля, що ставить за

мету зменшення загального впливу продукції на довкілля за допомогою покладення відповідальності на виробника за весь її життєвий цикл, зокрема за систему «take-back» (обов'язкового приймання виробником електронного обладнання, яке відпрацювало свій термін експлуатації), рециклінгу та кінцеве захоронення».

Розширена відповідальність виробника (РВВ) є ключовим принципом екологічної політики, що передбачає перенесення обов'язків за утилізацію продукції після завершення її життєвого циклу — з держави та споживача на виробника. Такий підхід дозволяє мінімізувати кількість електронних відходів, підвищити рівень їх переробки та зменшити негативний вплив на довкілля. У сфері електроніки РВВ охоплює зобов'язання виробників електричного та електронного обладнання забезпечувати збір, транспортування, переробку, знешкодження або повторне використання відходів, що утворюються після споживання продукції. Це може здійснюватися шляхом створення виробниками власних систем збору та переробки або ж участі у колективних схемах через організації з управління відходами.

Основні компоненти розширення сфер відповідальності виробників у галузі електронних відходів наведено в табл. 2.1. Виокремлення різних типів (компонентів) відповідальності дає змогу розподілити її між учасниками життєвого циклу продукції, проте в більшості законодавчих актів, які діють у країнах з розвиненою ринковою економікою, простежується покладання всієї відповідальності на виробників (дилерів, імпортерів) обладнання. Таким чином, у результаті комбінування всіх типів відповідальності досягається синергетичний ефект, завдяки якому виграють усі учасники життєвого циклу продукції. Наприклад, в Європейському Союзі Директива WEEE (Waste Electrical and Electronic Equipment) зобов'язує виробників фінансувати інфраструктуру збору й переробки, а також дотримуватись цільових показників збору (наприклад, 65% від середньої маси ЕЕО, введеної на ринок). В Японії виробники телевізорів, холодильників, пральних машин та кондиціонерів зобов'язані приймати стару техніку, яку споживачі здають.

Таблиця 2.1. Компоненти розширення сфер відповідальності виробника в галузі управління електронними відходами

№	Компонент	Пояснення
1	Фізична відповідальність	Виробник несе відповідальність за сервісне обслуговування продукції, її дизайн і якість. Виробник відповідальний за свою продукцію протягом усього її життєвого циклу
2	Фінансова відповідальність	Виробники мають фінансувати діяльність, пов'язану зі збиранням та утилізацією електронних відходів (включаючи інфраструктуру, інформування споживачів, утилізацію тощо).
3	Операційна відповідальність	Зобов'язання організовувати логістику, контейнери для збору, договірні відносини з переробними підприємствами
4	Інформаційна відповідальність	Надання споживачам інформації щодо способів утилізації, місць збору та небезпеки неправильного поводження з технікою
5	Екологічна відповідальність	Відповідальність, що настає в разі завдання екологічної шкоди продукцією на будь-якій стадії її життєвого циклу. Ступінь відповідальності визначається чинним законодавством.

Концепція розширеної відповідальності виробника широко застосовується в Нідерландах, Бельгії, Швеції, Німеччині, Канаді під час розроблення програм з управління поведінкою з електронними відходами [48, 49]. Вона дедалі частіше знаходить підтримку з боку вищих посадових осіб, діяльність яких пов'язана з екологією. В основі цієї стратегії лежить підтримання балансу між захистом довкілля та економічним розвитком, тому що екологічно ефективно управління продукцією та виробничими процесами підвищує надійність і репутацію виробників, збільшує можливості для комерційного розвитку та полегшує діалог і співпрацю з усіма учасниками життєвого циклу продукції.

Державні інституції під час розроблення програм з управління електронними відходами переміщують більшу частину відповідальності з

муніципальних органів на виробників продукції, ґрунтуючись на принципі «Платить той, хто забруднює» (Polluter-Pays Principle), що дістав відображення в законодавстві багатьох країн світу. Суть цього принципу – виробники несуть матеріальну відповідальність за шкоду, заподіяну навколишньому середовищу своєю антропогенною діяльністю, і не покладають ці витрати на суспільство. Такий підхід стимулює випуск екологічної продукції, що чинить мінімальний негативний вплив на навколишнє середовище протягом свого життєвого циклу, і залучає виробників та імпортерів електричного й електронного устаткування до розроблення ефективного механізму управління життєвим циклом своєї продукції, включно з кінцевою стадією (рециклінгом і кінцевим захороненням електронних відходів).

Згідно з Європейською Директивою ЄС про утилізацію електричного та електронного обладнання (WEEE), починаючи з 2006 року, збір відпрацьованих електроприладів та електрообладнання є обов'язковим. Основною метою Директиви WEEE є запобігання шкоді під час утилізації відходів електричного та електронного устаткування; створення умов для повторного використання та утилізації, та інших форм відшкодування використовуваних матеріалів і компонентів, а також для поліпшення екологічних показників усіх учасників. У табл. 2.2 наводиться Обов'язковий за ЄС показник з відновлення, повторного використання обладнання від кількості використовуваного.

Сьогодні в США і в Європі діють спеціальні ринки, де продаються демонтовані та відновлені компоненти плат, витягнуті з електронних відходів. Ці компоненти витягують на виробництвах, де використовують робототехнічні системи, що забезпечують можливість самостійної ідентифікації та демонтажу тих компонентів, на які існує дефіцит. Такий підхід дає змогу підтримувати необхідний набір компонентів, затребуваних на ринку, не перетворюючи одні види відходів на інші – нікому не потрібні запчастини.

Таблиця 2.2. Обов'язковий показник з відновлення та повторного використання обладнання в ЄС

Категорія обладнання	Відновлений об'єкт, %	Об'єкт, що повторно використовується, %
Побутова техніка широкого застосування	80	75
Побутова техніка вузького застосування	70	50
ІТ та телекомунікаційне обладнання	75	65
Побутова апаратура	75	65
Освітлювальне обладнання	70	50
Електричні та електронні інструменти	70	50
Іграшки, повсякденне обладнання та спортивний інвентар	70	50
Інструменти для моніторингу та контролю	70	50
Автоматичні розподільчі пристрої	80	75

Однак, постійне оновлення виробниками елементної бази та відносно низька вартість абсолютно нових компонентів неминуче призводять до серйозного обмеження повторного використання демонтованих компонентів через їхнє швидке застарівання.

Велика робота в утилізації електронних відходів відбувається в Китаї, де цей процес багато в чому пов'язаний з отриманням прибутку. Так, велика кількість невеликих китайських компаній займаються переробкою електронного сміття, витягаючи найцінніші компоненти з плат пристроїв, що викидаються, як-от накопичувачі даних, центральні і графічні процесори і навіть дрібні конденсатори і резистори. Після цього витягнуті матеріали йдуть на продаж у кращому разі після тестів на працездатність і з позначкою «б/в», у гіршому ж продають як абсолютно нові без жодних перевірок.

Саме цим пояснюється свого роду «лотерея» при купівлі дешевих китайських пристроїв від невідомих виробників. Подібна масштабна робота

призводить до того, що Китай з кожним роком переробляє дедалі більше електронного сміття, яке приносить багатьом компаніям гарний дохід.

Однак такі процеси мають перебувати під пильнішим контролем з боку спеціальних державних структур. Міжнародні угоди, покликані забезпечити ретельніший нагляд над переміщенням електронних відходів між державами, оскільки за відсутності однакових норм, багато відходів, залежно від цілої низки чинників, можуть вважатися або не вважатися відходами загалом або небезпечними відходами зокрема.

За загальним правилом, що міститься в додатку VIII до Базельської конвенції 1989 р. [1], електронні відходи підпадають під категорію «небезпечні», а отже, всі їхні транскордонні переміщення мають регулюватися положеннями цієї Конвенції. При цьому додаток IX передбачає виняток із загального правила. Так, електричні та електронні агрегати, призначені для «безпосереднього повторного використання», кваліфікуються як безпечні відходи. Ця ж норма вказує на те, що в деяких країнах електронні відходи, призначені для безпосереднього повторного використання, не розглядаються як відходи.

Такою лазівкою користуються багато компаній з розвинених країн, відправляючи більшу частину відходів, що підлягають утилізації, в країни, що розвиваються. Так, за деякими даними, близько 80% електронних відходів, що утворюються у США, відправляють, нібито «для повторного використання», у країни Африки та Азії зі слабкими режимами регулювання охорони праці та техніки безпеки поводження з відходами. У результаті цього, близько 75% таких пристроїв згодом визнаються такими, що не підлягають ремонту, і просто опиняються на звалищі, забруднюючи величезні території.

2.2 Правові основи та стан поводження з електронними відходами в Україні

Електронні відходи є однією з найшвидше зростаючих категорій відходів у світі, і Україна не є винятком. Неправильне поводження з такими відходами може призвести до серйозних екологічних та здоров'яних проблем через наявність небезпечних речовин, таких як свинець, ртуть та кадмій.

До основних законодавчих актів, що регулюють процеси поводження з електронними відходами в Україні треба віднести:

1. Закон України «Про управління відходами». Цей закон визначає правові, організаційні та економічні засади діяльності щодо запобігання утворенню, зменшення обсягів утворення відходів, їх збирання, перевезення, зберігання, оброблення, утилізації, видалення, знешкодження та захоронення. Він встановлює вимоги до підприємств щодо управління небезпечними відходами та зобов'язує виробників електронної техніки брати участь у процесі переробки.

2. «Національна стратегія управління відходами в Україні до 2030 року». Україна розробила та прийняла цю стратегію, яка передбачає впровадження європейських підходів до управління відходами, включаючи електронні, з метою зменшення їх негативного впливу на довкілля.

У 2024 році був оприлюднений оновлений проект Закону **«Про електричне та електронне обладнання та відходи електричного та електронного обладнання»**, який «розроблено з метою визначення правових, економічних і організаційних засад у сфері управління електричним та електронним обладнанням і відходами електричного та електронного обладнання для забезпечення екологічної безпеки, запобігання їх негативного впливу на здоров'я людей та навколишнє природне середовище шляхом запровадження системи розширеної відповідальності виробника, встановлення роздільного збирання та рециклінгу відходів електричного та електронного

обладнання, контролю за їх утворенням і обробленням, та повернення в економічний обіг вторинної сировини» [19].

Таким чином, проблема поводження з електронними відходами в Україні на сьогоднішній день залишається актуальною та водночас недостатньо врегульованою. За даними Міжнародного союзу електрозв'язку (ITU) та Глобального моніторингу е-відходів, у 2022 році Україна генерувала приблизно 6,5 кг електронних відходів на душу населення, при цьому рівень офіційної переробки становив менше 5 %.

Ситуація ускладнюється відсутністю комплексної національної системи збору та утилізації електронних відходів. Незважаючи на існування окремих приватних ініціатив та проектів громадських організацій, таких як «Електроніка – на переробку» чи «Здай батарейку – врятуй планету», загальнодержавна інфраструктура управління електронними відходами поки що відсутня. Законодавство також не відповідає вимогам ЄС, попри зобов'язання, закріплені в Угоді про асоціацію між Україною та ЄС. Зокрема, Україна досі не імплементувала ключову директиву WEEE 2012/19/EU, яка встановлює правила збору, обробки, утилізації та повторного використання електронного обладнання.

У країні відсутня система розширеної відповідальності виробника (РВВ), яка б зобов'язувала імпортерів та виробників електроніки фінансувати або організовувати збирання та переробку відходів. Це призводить до того, що левова частка електроніки після завершення терміну служби опиняється або на стихійних звалищах, або розбирається в неформальному секторі з грубими порушеннями екологічних норм. Така практика створює суттєві ризики для довкілля: небезпечні речовини, такі як свинець, кадмій, ртуть і бромовані вогнезахисні речовини, потрапляють у ґрунт, воду та атмосферу.

У великих містах, таких як Київ, Львів чи Дніпро, розпочато проекти з встановлення контейнерів для збору електроніки, батарейок і ламп, проте вони є епізодичними й не охоплюють усього населення. Також частина населення

здає стару техніку у мережі магазинів, що реалізують програму «утилізація при обміні», але ці програми не мають централізованої координації з боку держави.

У 2023 році в Україні почали готувати дорожню карту впровадження системи Розширення сфер відповідальності виробника, але процес перебуває лише на етапі розробки нормативної бази. В Україні система РВВ лише формується. Законодавчо принцип РВВ закріплено в Законах України «Про відходи» та в проєкті спеціального закону про електронні відходи. Водночас на практиці бракує:

- чітко визначених правил впровадження РВВ для електронного та електричного обладнання;
- механізмів контролю виконання обов'язків виробників;
- централізованих електронних реєстрів виробників та імпортерів;
- стимулів для прозорого та ефективного збору старої техніки.

Наразі більшість небезпечних відходів, що утворюються в домогосподарствах України, належно не утилізують. За статистикою, 40% старих мобільних телефонів власники зберігають у неробочому стані, 20% уживаних смартфонів перепродаються для повторного використання, 30% гаджетів викидають до змішаних побутових відходів із подальшим вивезенням на звалища, а лише 9-10% передають на утилізацію. Найнебезпечнішим елементом будь-якого електронного приладу є акумулятор, до складу якого входять свинець, хром, кадмій і ртуть. Разом із батареями це найбільша загроза довкіллю серед побутового сміття [23].

Деякі компанії (наприклад, Samsung, Philips, Eldorado) реалізують пункти прийому техніки у рамках власної корпоративної соціальної відповідальності. Також діють кілька пілотних програм за участі міжнародних екологічних організацій (наприклад, Arnika чи ОБСЄ), але загалом система ще не є масовою чи обов'язковою.

Більш широкий перелік відходів приймає на переробку Центр управління відходами (ЦУВ). Основні клієнти ЦУВ – великі бізнесові підприємства, які продукують найбільшу кількість небезпечних електронних відходів: аудіо-,

відео-, комунікаційної, комп'ютерної, офісної, побутової техніки електричного й електронного обладнання, люмінесцентних ламп, батарейок, акумуляторів тощо. За заявою представника компанії, 70% елементів із розібраної техніки передається на вторинне виробництво і лише 30%, які неможливо переробити, надходять далі на сміттєспалювальний завод «Енергія».

Також із середини 2021 року в Україні діє програма утилізації старих телефонів Samsung. Щоб віддати старий телефон на утилізацію, потрібно зателефонувати в контактний центр компанії або заповнити форму на сайті для отримання накладної, після чого надіслати пристрій «Новою поштою». Послуги з доставки для користувачів безкоштовні [23].

Підприємства в Україні, що займаються утилізацією та переробкою електронних відходів:

1. **УтільВторПром** – компанія надає послуги з утилізації електроніки та електрообладнання по всій території України, забезпечуючи професійний підхід та необхідну дозвільну документацію.

2. **Центр управління відходами** – ліцензована компанія, що надає послуги з утилізації всіх видів відходів електричного та електронного обладнання та інших видів небезпечних відходів.

3. **ЮрЕко** – підприємство є лідером серед фірм, які займаються утилізацією виробничих відходів в Україні, включаючи відходи електричних та електронних вузлів.

4. **УкрЕкоПром** – компанія надає послуги з утилізації відходів і знешкодження в Україні, співпрацюючи з різними підприємствами та організаціями.

5. **ЕКОВДМ** – основна діяльність компанії – це утилізація відходів від виробництв, їх переробка і збір цінних металів. У кожному обласному центрі України є центри прийому відходів.

Запровадження повноцінної системи розширення відповідальності виробника в Україні дозволить:

- збільшити частку зібраних та утилізованих електронних відходів;

- зменшити незаконне захоронення токсичних компонентів;
- створити нові робочі місця в секторі поводження з електронними відходами;
- залучити приватний бізнес до розвитку інфраструктури переробки.

Поточний стан поводження з електронними відходами в регіонах України наведено в табл. 2.3., яка сформована на основі відкритих даних та проєктів, активних у 2020–2024 роках [5, 6, 7, 74].

Як видно з аналізу табл. 2.2, лише декілька українських міст мають хоча б частково систематизовану інфраструктуру збирання та утилізації електронних відходів. Найбільш активними є великі міста, зокрема Київ, Львів та Івано-Франківськ, де розвинена участь громадських організацій, муніципальні програми та залучення населення. У більшості регіонів система збору відсутня або розвинута лише на рівні локальних ініціатив, що свідчить про потребу у створенні єдиної загальнонаціональної моделі поводження з електронними відходами.

Загалом, можна констатувати, що стан поводження з електронними відходами в Україні характеризується низьким рівнем організації збору, відсутністю державної координації, дефіцитом переробних потужностей та ризиками для довкілля та здоров'я населення. Вирішення цієї проблеми вимагає цілеспрямованої політики, гармонізації законодавства з нормами ЄС, запуску інституційних механізмів РВВ та розбудови інфраструктури роздільного збору та переробки електронних відходів.

Таблиця 2.3. Ініціативи та інфраструктура поводження з електронними відходами в містах України

Міста України	Основні ініціативи та практики	Контейнери для збору	Пункти прийому	Програми утилізації	Коментарі
Київ	Проєкт «Зелений птах»	+	50+	Так (окремі ТРЦ)	Найбільш розвинена система
Львів	Green Box, Zero Waste Lviv, «Здай батарейку»	+	20+	Так (через Еко-Бус)	Активне еко-середовище
Харків	Еко-сервіси в	±	~10	Обмежено	Недостатня

	ТРЦ, підтримка ГО				координація
Дніпро	Комунальні контейнери, еко-освіта	±	~15	Локально	Системність відсутня
Одеса	Пілотні контейнери, ГО «Зелений лист»	–	~5	Обмежено	Слабкий збір, неформальний сектор
Івано-Франківськ	Співпраця з «Арніка», муніципальні збори	+	10+	Так	Приклади системної підтримки
Запоріжжя	Початкові проекти з утилізації	–	<5	Відсутня	Початковий рівень організації
Чернівці	Локальні ініціативи ГО та ВНЗ	±	~5	Локально	Мала кількість проектів
Миколаїв	Ініціативи в ТРЦ, без централізації	–	~3	Відсутня	Необхідна підтримка з боку міста
Полтава	Освітні заходи, контейнери при навчальних закладах	±	~5	Обмежено	Вузьке охоплення населення

Умовні позначення: + – наявна розвинена система/інфраструктура; ± – часткова присутність або нерегулярна діяльність; – – відсутність або вкрай обмежені можливості.

2.3 Основні аспекти та ключові етапи процесу переробки електронних відходів

Сучасна система поводження з електронними відходами (е-відходами) базується на принципах сталого розвитку, ресурсоефективності, циркулярної економіки та мінімізації негативного впливу на навколишнє середовище. Методика обробки таких відходів залежить від їх складу, ступеня небезпеки, економічної доцільності та рівня технічного розвитку країни.

Переробка електронних відходів – це не тільки екологічна, а й економічна можливість. Створення підприємств з утилізації, розвиток вторинного виробництва та переробки створюють нові робочі місця та стимулюють інновації. Таким чином можна обґрунтувати основні аспекти, що визначають необхідність утилізації електронних відходів (табл. 2.4).

Таблиця 2.4. Основні аспекти, що визначають необхідність утилізації електронних відходів

№	Аспект	Пояснення
1	Охорона довкілля	Електронні відходи містять токсичні речовини (ртуть, свинець, кадмій тощо), які під час потрапляння в навколишнє середовище забруднюють повітря, ґрунт і воду. Утилізація запобігає витоку цих небезпечних речовин і зберігає екосистеми.
2	Захист здоров'я людини	При неправильній утилізації (наприклад, спалюванні або захороненні) токсини можуть проникати в організм через повітря, воду та їжу. Це може викликати серйозні захворювання, включно з онкологією, ураженням органів і порушенням розвитку в дітей.
3	Збереження цінних ресурсів	Електроніка містить дорогоцінні та рідкісноземельні метали: золото, срібло, мідь, платину тощо. Утилізація дає змогу витягувати та повторно використовувати ці матеріали, знижуючи потребу у видобутку природних ресурсів.
4	Скорочення обсягів відходів, які надходять на полігони	Зі зростанням споживання електроніки збільшується кількість відходів. Без утилізації звалища переповнюються, а відходи залишаються в природі на сотні років. Переробка зменшує навантаження на полігони та зберігає територію.
5	Економічна вигода	Розвиток галузі утилізації створює робочі місця, нові технології та бізнес-моделі (наприклад, повторне використання компонентів). Це стимулює циркулярну економіку та сталий розвиток.
6	Правове та міжнародне регулювання	Багато країн уже ухвалили закони, що зобов'язують утилізувати е-відходи. Недотримання цих вимог може призвести до штрафів, заборон на експорт/імпорт техніки та погіршення міжнародної репутації.
7	Формування екологічної культури	Відповідальне поводження з технікою, зокрема її здача на переробку, сприяє формуванню у громадян культури сталого споживання і турботи про майбутнє планети.

Компанії можуть отримувати вигоду з використання перероблених матеріалів, а держави – знижувати залежність від імпорту ресурсів. Утилізація

стає частиною нової «зеленої економіки», де екологія та економіка працюють в одному напрямку.

Утилізація електронних відходів – це частина загальної культури відповідального споживання. Люди, які здають техніку на переробку, формують звички дбайливого ставлення до природи, раціонального використання ресурсів і поваги до майбутніх поколінь.

Просвітництво населення про важливість утилізації сприяє підвищенню рівня екологічної свідомості та підтримує перехід до сталого способу життя. Утилізація електронних відходів – це не просто технологічний процес, а багатоаспектне завдання, що зачіпає екологію, здоров'я, економіку і культуру суспільства. Ігнорування цієї проблеми веде до наростаючої кризи, тоді як її своєчасне розв'язання відкриває шлях до безпечного, здорового і сталого майбутнього. Кожній людині, підприємству і державі важливо усвідомити свою роль у цьому процесі та зробити внесок в екологічне благополуччя планети.

Електронні відходи умовно поділяють на кілька категорій: побутова електроніка(мобільні телефони, телевізори, комп'ютери, принтери); промислове обладнання (сервери, системи управління, медична техніка); дрібна техніка (електробритви, фени, електрочайники);комплектуючі та кабелі. Кожна з категорій має особливості у складі та потребує індивідуального підходу до переробки. Процес переробки електронних відходів включає кілька ключових етапів, представлених на рис. 2.1.



Рис. 2.1. Ключові етапи процесу переробки електронних відходів

Утилізація електроніки має відбуватися на спеціалізованих заводах із дотриманням усіх вимог технологічного процесу і правил техніки безпеки. Будівництво та робота підприємств з утилізації електроніки обходяться досить дорого. Тому деякі підприємці часто нехтують усіма необхідними міжнародними правилами, допускаючи суттєві порушення в процесі виділення шкідливих речовин з електронних відходів і подальшої їх утилізації.

У відходах електроніки присутня велика кількість токсинів, які в разі потрапляння у внутрішні органи через шкіру або дихальні шляхи здатні викликати розвиток небезпечних хронічних захворювань. Також у разі неправильної утилізації електронної техніки вони можуть потрапляти в повітря, ґрунт або водойми, отруюючи їх і проникаючи в рослини та живі організми. До подібних елементів належать важкі метали, такі як: ртуть, миш'як, свинець, кадмій та інші.

До речовин, що активно забруднюють природу, належать так звані стійкі органічні забруднювачі. Вони активно виділяються в процесі розбирання, утилізації та переплавлення деталей електронної техніки. До них належать бромовані або хлоровані феніли та ефіри.

Крім того, у разі порушення технології утилізації, може не повністю прогорати паливо, що використовується для переплавки. У цьому випадку відбувається виділення в навколишнє середовище ароматичних вуглеводнів, що становлять небезпеку для людини. Ці продукти згорання викликають захворювання дихальних шляхів і серцево-судинної системи людини.

2.4 Коротка характеристика існуючих методів переробки електронних відходів

Технології переробки відходів електроніки поділяються на кілька категорій. Усі категорії відрізняються вмістом і вартістю елементів, одержуваних у результаті переробки відходів.

До *першої категорії* належать елементи з малим вмістом дорогоцінних металів. Це електричні плати телевізорів, блоків живлення, комп'ютерів, мікрохвильових печей та іншої побутової електронної техніки.

Друга категорія – радіоелементи з більш високою кількістю цінних металів.

Найцінніша категорія містить елементи з високим вмістом золота, платини, паладію та інших рідкоземельних металів: інтегральні схеми, оптоелектроніка.

1. Первинне сортування, ручне розбирання та демонтаж. На початковому етапі е-відходи проходять ручне сортування та демонтаж, під час якого відокремлюються придатні до повторного використання елементи, небезпечні компоненти (акумулятори, конденсатори, ртутні лампи), а також деталі, що містять дорогоцінні або критичні метали. Цей процес дозволяє мінімізувати подальше поширення шкідливих речовин та підвищити

ефективність наступних технологічних стадій.

Перевагами цього методу є гнучкість і високий ступінь вилучення цінних компонентів. Проте недоліки включають трудомісткість, потребу у спеціалізованому персоналі та низьку продуктивність при великих обсягах відходів.

Електротехнічні відходи, або відходи так званої «білої» побутової техніки, характеризуються переважанням у своєму складі чорних і кольорових металів, пластмас та інших конструкційних матеріалів. Це холодильники, пральні машини, плити тощо. Частка власне електроніки у вигляді блоків управління (процесорів) тут невелика. Компоненти цих відходів привабливі для переробки, і їх охоче купують спеціалізовані підприємства. Тож за правильного підходу до організації збору та сортування можна звести до мінімуму їхнє надходження на полігони. Обробка їх складається з уважного ручного розбирання з поділом пластиків за видами, чорних і кольорових металів, скла, гуми тощо.

2. Механічна переробка. Після ручного розбирання матеріали направляють на механічну переробку. Суть цього процесу полягає у подрібненні електронного обладнання з подальшою сепарацією на фракції: метали (чорні та кольорові), пластик, скло тощо. Сепарація здійснюється за допомогою магнітних, вихрових, вібраційних і гравітаційних технологій.

Метод забезпечує високий рівень автоматизації, що знижує витрати на оплату праці та підвищує продуктивність. Проте існує ризик розпилення токсичних компонентів (наприклад, важких металів) у повітря під час подрібнення, що вимагає ефективної системи фільтрації.

Пластики, розібрані за видами, теж дробляться, пресуються і переробляються. Утилізація скла і гуми також не становить труднощів. Компоненти, що залишилися, являють собою вже відходи електронної техніки.

Основою сучасної мікроелектроніки є напівпровідникові мікросхеми. Більшість мікросхем виготовлено на основі кремнію. Корпус нерозбірний: порожнистий металевий або литий пластиковий. Присутні метали на основі

сплавів міді та нікелю, трохи вісмуту, алюмінію і навіть золота. Мікросхеми монтуються разом з іншими деталями на друкованій платі, яка у своєму складі має мідь, олов'яно-свинцевий припій (часто з вмістом срібла), склопластик, лакові покриття. Ті самі приблизно речовини і матеріали містять й інші радіодеталі, яких на друкованій платі безліч. Під час підготовки до утилізації основним завданням є швидко і дешево випаяти з друкованої плати мікросхеми і найцінніші деталі та згрупувати їх за видами. Відокремити дроти і роз'єми. Для виконання цих завдань використовується спеціальне обладнання, але без навченого досвідченого оператора не обійтися. Потім для кожної групи компонентів застосовується своя технологія рекуперації, тобто вилучення корисного вторинного матеріалу.

3. ***Хімічні методи переробки електронних відходів.*** Хімічні методи переробки електронних відходів базуються на застосуванні хімічних реагентів для розчинення, осадження, селективного вилучення або перетворення компонентів електронного обладнання. Найчастіше ці методи використовуються для **вилучення кольорових, рідкоземельних і дорогоцінних металів** із друкованих плат, кабелів, мікросхем тощо. Їх умовно поділяють на: **гідрометалургію**, **пірометалургію**, **електрохімічні**, а також **біохімічні** (мікробіологічні) процеси.

Гідрометалургія полягає у вилуговуванні цінних металів (зокрема золота, міді, срібла, паладію) із подрібненої маси е-відходів за допомогою кислотних або лужних розчинів. Після цього метали осаджуються, очищуються і відновлюються. Гідрометалургія дозволяє з високою ефективністю вилучати цінні компоненти, проте супроводжується утворенням значних об'ємів токсичних рідких відходів. Крім того, потребує застосування агресивних реагентів, що ускладнює екологічне обґрунтування методу.

Пірометалургічні процеси передбачають термічне розкладання матеріалів при високих температурах з метою вилучення металів у розплавленому вигляді. Найчастіше застосовується для отримання міді, олова, золота, свинцю. Основною перевагою є швидкість і можливість переробки великих обсягів

змішаних елементів. Проте недоліки включають високе енергоспоживання, виділення димових газів із важкими металами та складні системи очищення викидів.

Інсинерація (спалювання) електронних відходів використовується здебільшого для знищення органічних компонентів або композитних матеріалів, не придатних до подальшої переробки. Під час цього процесу може генеруватися теплова енергія (waste-to-energy), проте викиди діоксинів, фуранів і важких металів становлять серйозну екологічну загрозу. Цей метод є неприйнятним без сучасних систем очищення газів і моніторингу викидів. У більшості розвинених країн використання інсинерації для е-відходів є мінімізованим або забороненим.

У контексті зростання обсягів електронних відходів активно досліджуються такі інноваційні технології:

- мікробіологічне вилучення металів – використання бактерій для розкладання компонентів та вилучення металів з друкованих плат;
- мікрохвильове піролізне розкладання – застосування мікрохвиль для термічної деструкції пластмас із мінімальними викидами;
- кріогенне подрібнення – замороження деталей з подальшим дробленням у крихкий стан для збереження чистоти фракцій.

Хоча ці методи поки що залишаються переважно у стадії наукових досліджень або пілотних проєктів, вони мають великий потенціал у сфері екологічно безпечного рециклінгу.

Узагальнений опис способів переробки електронних відходів наведено в табл. 2.5.

Таблиця 2.5. Існуючі методи переробки електронних відходів

Метод	Сутність методу	Ефективність
Попередні методи		
Механічна переробка	Розібрані деталі розмелюють до необхідних розмірів, після чого вони надходять на установку тонкого подрібнення.	Являють собою грубу переробку; є необхідним етапом при використанні фізичних і хімічних методів утилізації відходів. Неминучі втрати дорогоцінних матеріалів.
Метод повітряної сепарації	У повітряному сепараторі відбувається поділ важких і легких частинок. Через різницю в щільності і масі, частинки різного розміру осідають з різною швидкістю і займають свої області в сепараторі.	
Фізичні методи		
Електростатичний метод	Під дією електричного поля металеві частинки відокремлюються від пластмасових, змінюючи параметри поля відокремлюють частинки одних металів від інших.	Мають менші витрати, простіше реалізуються і не завдають шкоди навколишньому середовищу. Затребовані тільки при переробці металевої фракції, оскільки несуть у собі грубе очищення від домішок.
Магнітна сепарація	Технологія розділення матеріалів на основі відмінності їхніх магнітних властивостей (магнітної сприйнятливості) і різної поведінки матеріалів у зоні дії магнітного поля, що змінює гравітаційну траєкторію матеріалів.	
Хімічні методи		
Піроліз	За допомогою нагрівання подрібненої маси можна поступово відокремити речовини, що мають різну температуру плавлення. У процесі виділяються гази і вуглеводні, що застосовуються як паливо або сировина для хімічної промисловості.	Мають більшу вартість, порівняно з фізичними методами; є більш складними. Є незамінними під час розділення металевої та неметалевої фракцій.
Гідрометалургійний метод	На відходи впливають кислотами і лугами з подальшим електролізом з метою виділення із загальної маси різних металів. Цей спосіб ефективний, але шкідливий для здоров'я через застосування небезпечних речовин.	
Пірометалургійний метод	Процес вилучення металів з використанням високих температур. Подрібнені відходи завантажуються в плавильну піч (температура 1200-1500°C). Органіка згорає, неметали випаровуються, а метали розплавляються.	
Біометалургійний метод	Метод полягає у виділенні дорогоцінних металів з мідної руди за допомогою мікроорганізмів, що використовують ці метали в процесі свого життя.	
Газифікація	Відходи нагріваються до температури 1600°C у системі печей з постійною подачею кисню. У результаті охолодження газів, що виділяються, утворюється синтез-газ. У складі газу присутній водень, цей газ - сировина для отримання метанолу. Після відповідного опрацювання він використовується для отримання електричної та теплової енергії.	

Велика кількість різнотипного обладнання, складність конфігурацій обладнання, а також багатокомпонентність складу електронних відходів вимагають застосування найрізноманітніших способів переробки. У багатьох країнах найчастіше застосовується технологія пірометалургійної переробки електронного брухту. Переробка такої вторинної сировини здебільшого орієнтована на мідеплавильні комбінати і зводиться до перетворення електронного брухту, що містить благородні метали, на сплав із міддю. Далі чорнова мідь піддається електролітичному розчиненню анодів, у процесі якого утворюється анодний шлам, збагачений дорогоцінними металами.

Утилізація мідних дротів має відбуватися без використання примітивного методу випалювання ізоляції, який є дуже небезпечним для довкілля. Електроізоляція дротів виготовляється з полімерів, під час спалювання яких утворюються шкідливі гази, іноді смертельно небезпечні для людини і дуже шкідливі для природи. Особливо вирізняються в цьому популярний полівінілхлорид і фторопласт, що рідко зустрічається. Під час низькотемпературного згоряння полівінілхлориду утворюються надотруйні речовини - діоксини. Токсичність у них така ж, як у ціанистого калію. А окислюватися і перетворюватися на відносно нешкідливі речовини вони починають при 800 градусах. Температура горіння в багатті 300 градусів, а в печі - 600 градусів.

Існує промисловий спосіб відділення міді від ізоляційних матеріалів. Він полягає в дробленні дротів з подальшим вібраційним впливом, під час якого оболонка відокремлюється від металу і потім «спливає» в псевдорідкому середовищі. Спосіб простий, ефективний, що вимагає застосування нескладного обладнання. Щоб цей спосіб взяв гору, потрібно забезпечити надходження таких відходів на правильну переробку, а не на спалювання у вогнищах. Для цього необхідно стимулювати населення матеріально, законодавчо призначивши заставну ціну, яку отримає громадянин, якщо здасть, наприклад, свій телевізор або телефон, який відслужив свій термін, у

спеціалізований приймальний пункт. Або прямо в торговельну організацію, попутно отримавши знижку на купівлю нового подібного товару.

Така схема вже працює у великих мережевих магазинах під час продажу великогабаритної побутової техніки. Покупці охоче здають обладнання, що вийшло з ладу, рятуючи довкілля з матеріальною вигодою для себе. Цей позитивний досвід слід поширити на весь спектр електротехнічних та електронних товарів.

Таким чином, сучасні методи поводження з електронними відходами відрізняються за ступенем складності, ефективності, вартості й екологічного впливу. Вибір конкретного методу залежить від наявної інфраструктури, обсягів відходів, складу матеріалів і національного законодавства. Найефективнішими вважаються комбіновані підходи, що поєднують ручне розбирання, механічну переробку та екологічно обґрунтовані методи вилучення цінних ресурсів.

РОЗДІЛ 3

ХАРАКТЕРИСТИКА ТЕХНОЛОГІЙ ПЕРЕРОБКИ ДРУКОВАНИХ ПЛАТ

3.1 Обґрунтування вибору виду електронного відходу для об'єкта дослідження

У структурі електронних відходів друковані плати (ДП) відіграють ключову роль, оскільки є невід'ємною складовою майже всіх електронних пристроїв – від мобільних телефонів і ноутбуків до побутової техніки й промислових систем управління. Їхній склад відзначається високою концентрацією цінних ресурсів (зокрема, благородних і кольорових металів) у поєднанні з токсичними компонентами, що створює як економічну доцільність, так і екологічну необхідність для окремого розгляду цього виду відходів у рамках дослідження.

Основні причини вибору даного виду електронних відходів для дослідження наведено нижче.

Високий вміст цінних металів. Друковані плати містять значну кількість золота, міді, срібла, паладію, які в 10–50 разів концентрованіші, ніж у природній руді. Це робить переробку плат одним із найбільш ресурсозберігаючих джерел вторинної сировини.

Складність утилізації та екологічні ризики. Через наявність небезпечних речовин (наприклад, бромованих антипіренів, свинцю, кадмію) спалювання або захоронення друкованих плат створює високі екологічні ризики, включно з викидами діоксинів та важких металів у довкілля. Це підвищує значущість вибору екологічно безпечних технологій переробки.

Висока частка в об'ємі електронних відходів. За даними міжнародних досліджень, на друковані плати припадає близько 3–5 % загальної маси електронних відходів, але саме вони концентрують до 40 % вартості корисних компонентів, що робить їх пріоритетними для утилізації з економічної точки зору.

Можливість застосування різних технологічних підходів. Друковані плати можуть бути перероблені за допомогою механічних, хімічних та термічних методів, що дозволяє провести порівняльне дослідження різних способів утилізації з точки зору екологічної ефективності та енерговитрат.

В Україні зростає кількість відпрацьованої електроніки, але система поводження з друкованими платами майже не регламентована, а більшість таких відходів вивозиться нелегально або захоронюється. Це створює вікно можливостей для впровадження інноваційних, локально адаптованих рішень, з урахуванням екологічних вимог та ресурсозбереження.

Отже, вибір друкованих плат як об'єкта дослідження є науково обґрунтованим, логічним і дозволяє сконцентруватися на одному з найбільш екологічно й економічно важливих фрагментів системи поводження з електронними відходами.

3.2 Типовий матеріальний склад друкованої плати та процес її демонтажу

Друкована плата (ДП) – це основа будь-якого електронного пристрою, на якій розміщені та з'єднані електронні компоненти (резистори, мікросхеми, конденсатори, транзистори тощо). Вона виконує функцію електричного провідника та механічного носія для елементів електронної схеми. Вона являє собою пластину з діелектрика, на якій згідно з електричною схемою розміщено мікроелектронні компоненти, як-от напівпровідникові мікросхеми та конденсатори, з'єднані провідниковими доріжками (рис. 3.1).

Основні характеристики друкованої плати наступні:

- матеріал основи – найчастіше це епоксидно-скляний композит (FR-4) або інші полімерні матеріали з високою термостійкістю. Містить скловолокно, полімери, іноді кераміку;

- металеві провідники (провідні доріжки) виготовляються з мідної фольги, що створює електричні з'єднання між компонентами. Може містити покриття з олова, золота, нікелю або срібла.

Існує декілька типів друкованих плат:

- односторонні (дорожки з одного боку).
- двосторонні (дорожки з обох боків).
- багатошарові (містять кілька шарів провідників і діелектриків, використовуються в складних пристроях).

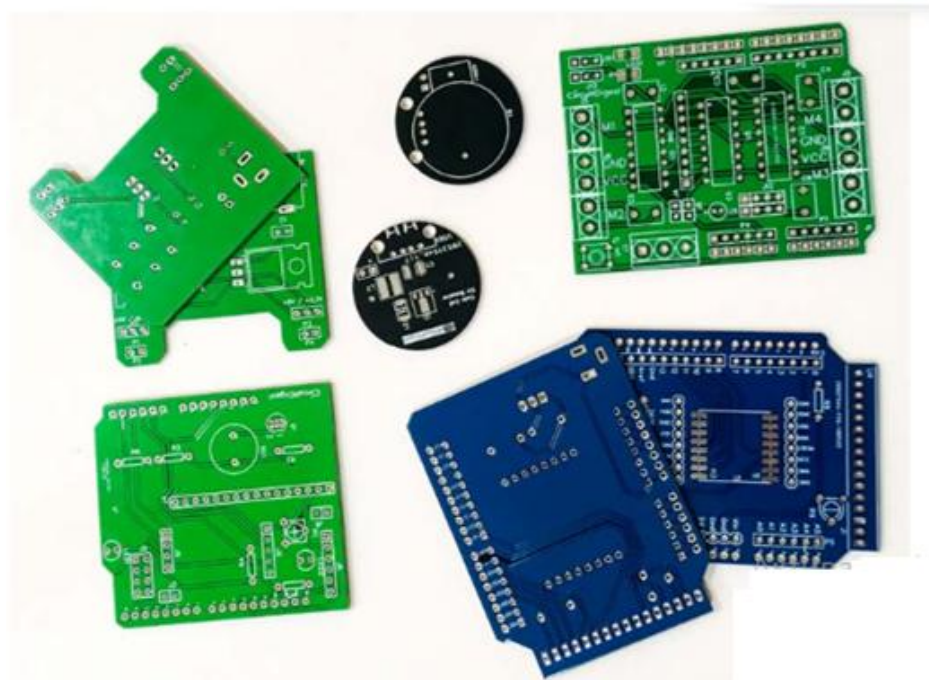


Рис. 3.1. Друковані плати

Друкована плата виконую наступні функції:

- забезпечує фіксацію електронних компонентів.
- забезпечує електричні з'єднання між ними.
- виконує роль тепловідводу та екранування.

Коли електронні пристрої стають непридатними, друковані плати стають частиною електронних відходів. Вони цінні завдяки вмісту металів, але одночасно небезпечні через токсичні речовини в складі (свинець, бромовані сполуки, важкі метали).

Таким чином, укомплектована друкована плата складається з таких матеріалів як: скло, кераміка, полімерні матеріали, метали (рис. 3.2). Дані, представлені на рис. 3.3, свідчать про досить високий вміст цінних компонентів у брухті друкованих плат.

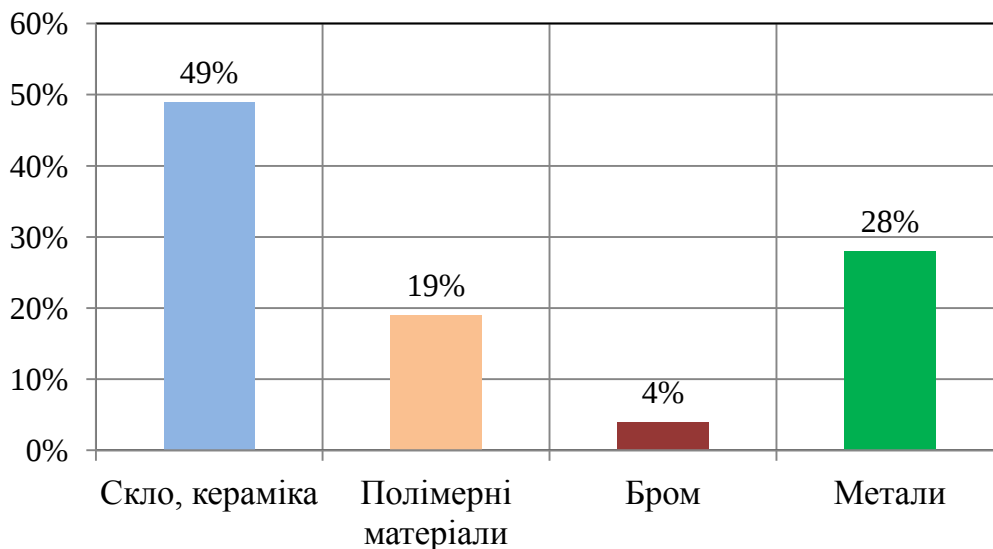


Рис. 3.2. Типовий матеріальний склад укомплектованої друкованої плати

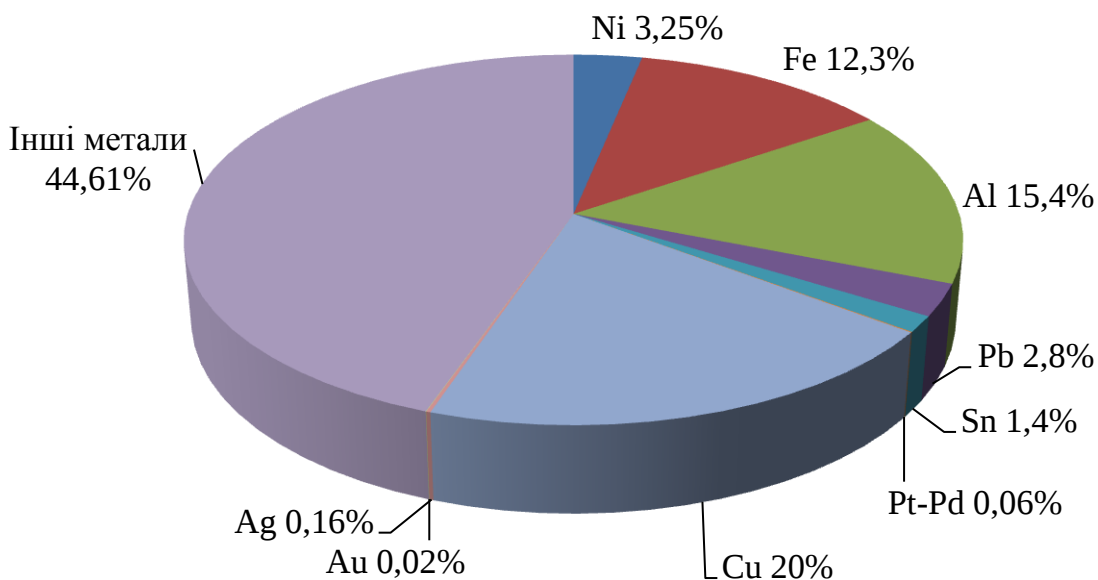


Рис. 3.3. Основні цінні метали в брухті друкованих плат, %

Для підприємств-виробників друкованих плат цей факт, безумовно, є втраченою можливістю отримання додаткового доходу. Наприклад, при утворенні брухту друкованих плат у кількості 30,6 тис. тонн на рік і вмісті золота в брухті 185 г/т – для високосортних і 50 г/т – для низькосортних плат, потенційний дохід може становити 113,28 млн. доларів і 2,38 млн. доларів на рік відповідно. За умови комплексної переробки та вилучення інших компонентів наведені цифри можуть зрости в кілька разів. Переробка електронних відходів дає змогу повертати ці ресурси у виробництво, знижуючи потребу у видобутку і зберігаючи невідновлювані запаси. Це один із ключових принципів циркулярної економіки, спрямованої на повторне використання матеріалів і зменшення відходів.

Переробка плат охоплює три етапи обробки: попередню обробку, фізичну переробку і хімічну переробку. У попередню обробку входить демонтаж багаторазових і токсичних елементів, подрібнення або поділ. Потім слідує фізична переробка. Потім матеріали витягують шляхом хімічного процесу переробки.

Процес демонтажу друкованих плат з електронних пристроїв – це перший і дуже важливий етап у переробці електронних відходів, який дозволяє відокремити плати від корпусів і компонентів з метою подальшої утилізації або рециклінгу. Він включає як механічні, так і ручні операції. Нижче наведено детальний опис основних етапів:

1. Підготовчі роботи. Перед початком демонтажу пристрій перевіряють на:

- наявність небезпечних елементів (акумулятори, батареї, конденсатори, лампи з ртуттю тощо);
- стан (цілий чи пошкоджений корпус);
- тип електроніки (побутова, офісна, промислова).

2. Первинний розбір:

- ручне розбирання корпусу – відкручування або відкриття корпусу пристрою за допомогою викруток, різців, спеціальних ключів;

- вилучення друкованої плати – витягується з пристрою після зняття кріплень або засувки.

3. Сортивання компонентів:

- елементи, що можуть бути небезпечними (акумулятори, ЖК-екрани, батареї), відокремлюються в окремі потоки;

- окремо відбираються пластикові та металеві деталі корпусу, кабелі, конектори тощо.

4. Знеструмлення та знешкодження. Важливо переконатися у відсутності залишкової напруги. Великі електролітичні конденсатори можуть попередньо розряджатися.

5. Додаткові операції. Якщо плата зберігає цінні елементи (мікросхеми, конденсатори, резистори), можливий ручний демонтаж електронних компонентів для їх подальшої селективної переробки. Деякі підприємства використовують термофен або ІЧ-нагрівачі, щоб легше знімати компоненти без пошкодження.

Демонтаж друкованих плат – це енергетично неінтенсивний, але трудомісткий процес, який потребує точності та дотримання правил безпеки. Його перевага – можливість попереднього сортування матеріалів, що значно підвищує ефективність подальших технологічних етапів (пірометалургії, гідрометалургії тощо).

Демонтуються радіоелементи з друкованих плат ручним, автоматичним або напівавтоматичним методом. При використанні тільки автоматичного методу виникають проблеми з демонтажем найдрібніших деталей і повним видаленням елементів, що містять токсичні речовини. А ручний спосіб трудомісткий і повільний. Напівавтоматичний метод передбачає одночасне нагрівання паяних елементів і застосування механічних видів впливу, таких як удари і вібрації. Крім того, застосовується видалення радіоелементів за допомогою ріжучого інструменту: механічних ножиць і кусачок (табл. 3.1)

Таблиця 3.1. Порівняння методів демонтажу друкованих плат

Критерій	Ручний демонтаж	Напівавтоматичний демонтаж	Автоматизований демонтаж
Опис процесу	Виконується вручну інструментами (пінцети, викрутки, фен)	Поєднання ручної роботи з використанням спеціального обладнання (термостоли, шейкери, ручні паяльні системи)	Повністю машинний процес, за допомогою роботизованих комплексів
Продуктивність	Низька (20–50 пристроїв/год)	Середня (80–150 пристроїв/год)	Висока (до 300–500 пристроїв/год і більше)
Якість сортування	Висока при кваліфікованому персоналі	Висока, залежно від навичок і точності пристроїв	Середня–висока (залежить від налаштувань сенсорів і систем візії)
Інвестиції на старті	Низькі	Середні (обладнання потребує вкладень, але доступне)	Високі (робототехніка, автоматизовані лінії, програмне забезпечення)
Енергоспоживання	Дуже низьке	Низьке–середнє	Високе
Гнучкість під різні пристрої	Висока — легко адаптуватися	Висока – можливе регулювання режимів	Низька – складне переналаштування
Безпека працівників	Потребує високої уваги та захисту	Краща безпека, ніж при ручному, але все ще залежить від оператора	Висока – мінімальний людський контакт
Збереження компонентів	Висока	Висока (контрольоване нагрівання, обережне вилучення)	Середня (можливі пошкодження через швидкість та механічний вплив)
Рівень відходів	Низький	Середній	Вищий (часто залишаються неперероблені дрібні елементи)
Обслуговування	Мінімальне	Помірне (калібрування, перевірка обладнання)	Високе (профілактика, заміна модулів, програмне оновлення)

Напівавтоматичний демонтаж – це оптимальний варіант для середніх підприємств або стартапів у сфері переробки електронних відходів. Він поєднує помірну вартість, достатню ефективність і гнучкість. Автоматизовані системи економічно доцільні для масових потоків, проте потребують стандартизованої сировини та значних інвестицій. Ручний демонтаж зберігає найбільше цінних елементів, але обмежений масштабом і швидкістю. Він доцільний на малих

об'ємах, для цінних або складних у розбиранні пристроїв, а також для підприємств із невеликим бюджетом

3.3 Технології переробки друкованих плат

Механічна переробка – це фізичний метод переробки, за якого розібрані деталі розмелюють до необхідних розмірів (рис. 3.4), після чого вони надходять на установку тонкого подрібнення. Отриманий порошок піддають впливу вихрових струмів у сепараторах, де метали відокремлюють завдяки їхній електропровідності. Потім порошок розділяють залежно від щільності та розмірів частинок. Розшарування на різні матеріали можна спостерігати в стовпі рідини.

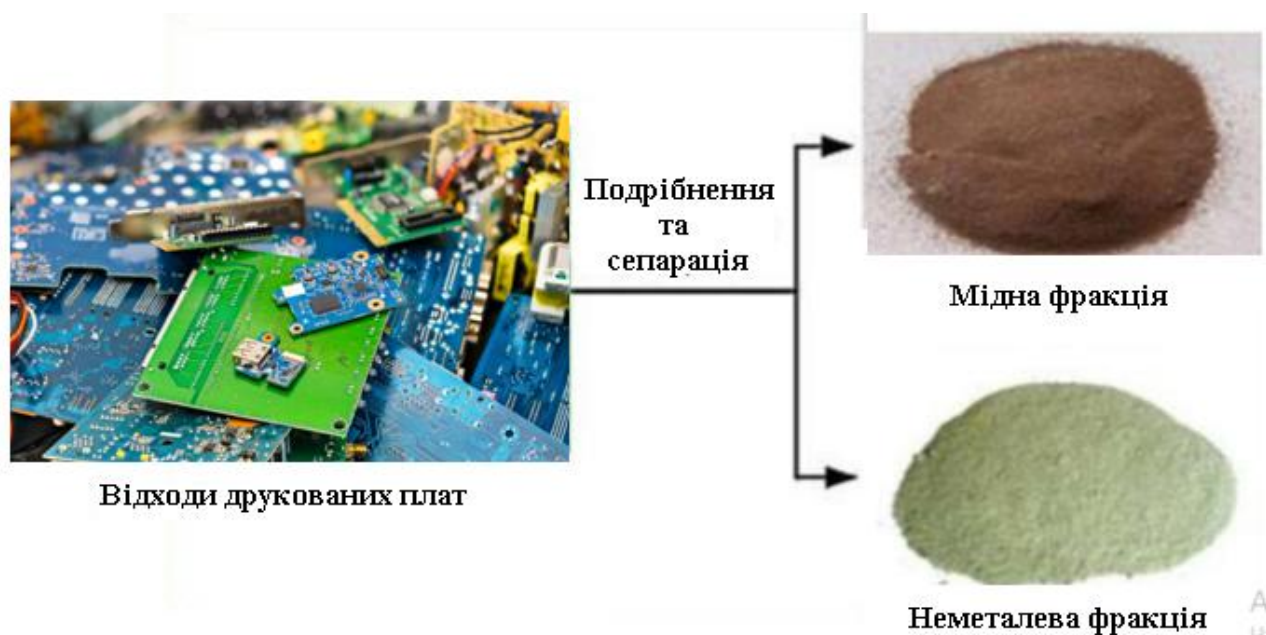


Рис. 3.4. Механічна переробка друкованих плат

Методом повітряної сепарації поділ диспергованих твердих частинок, що відбувається завдяки різним розмірам і густині частинок. Підвішені в газі частинки, в основному в повітрі, займають різні положення в сепараторі під впливом різних сил залежно від матеріалу. У важких частинок гранична швидкість осадження більша, ніж швидкість повітря, у той час як у більш легких частинок гранична швидкість осадження менша за швидкість повітря.

Отже, важкі частинки переміщуються вниз проти повітряного потоку, тоді як легкі частинки піднімаються разом із повітряним потоком у верхню частину сепаратора (рис. 3.5).

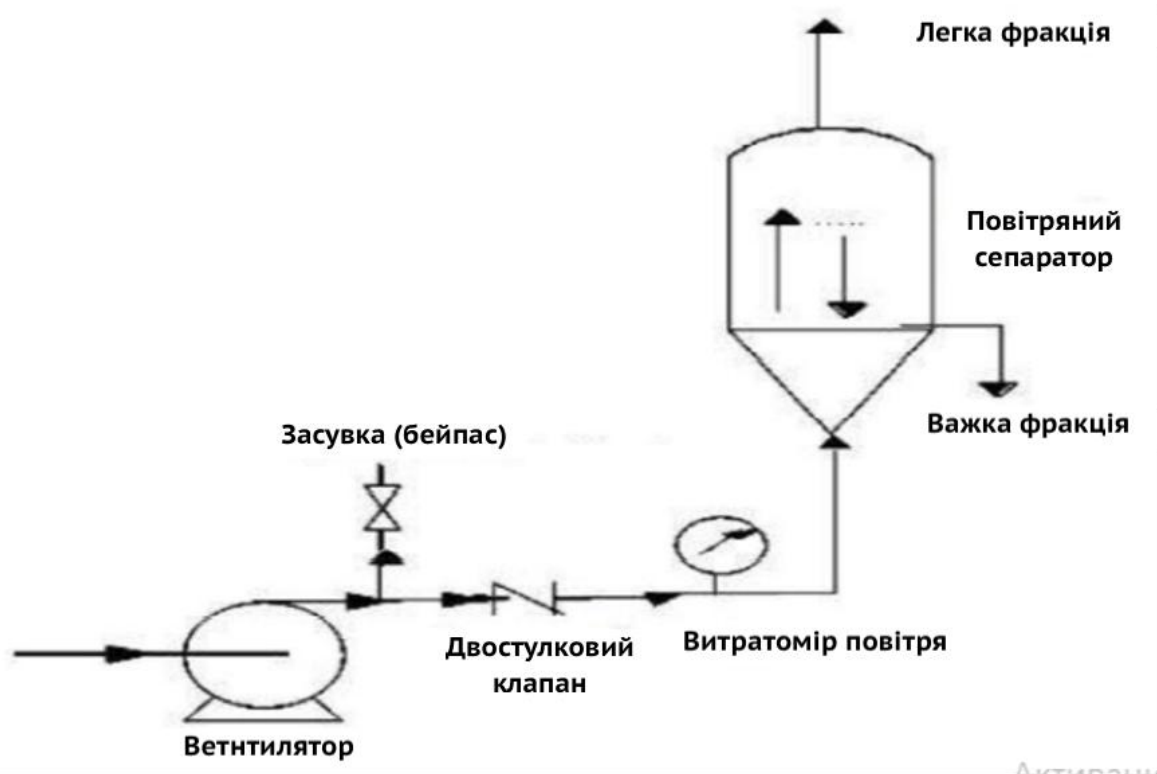


Рис. 3.5. Принцип повітряної сепарації відходів друкованих плат

Електростатичний метод для розділення сипучих матеріалів використовує електростатичне поле, яке впливає на заряджені або поляризовані тіла. Метод ґрунтується на відмінностях у траєкторії переміщення заряджених коротким розрядом, тертям та іншими способами частинок в електричному полі (рис. 4.6а). Схему електростатичного барабанного сепаратора з плоским електродом, що протистоїть, наведено на рис. 4.6б.

Ці технології застосовуються для переробки металів і пластмас із промислових відходів. Електростатичні технології розділення можуть використовуватися для відокремлення Cu, Al, Pb, Sn і заліза та деяких благородних металів і пластику.

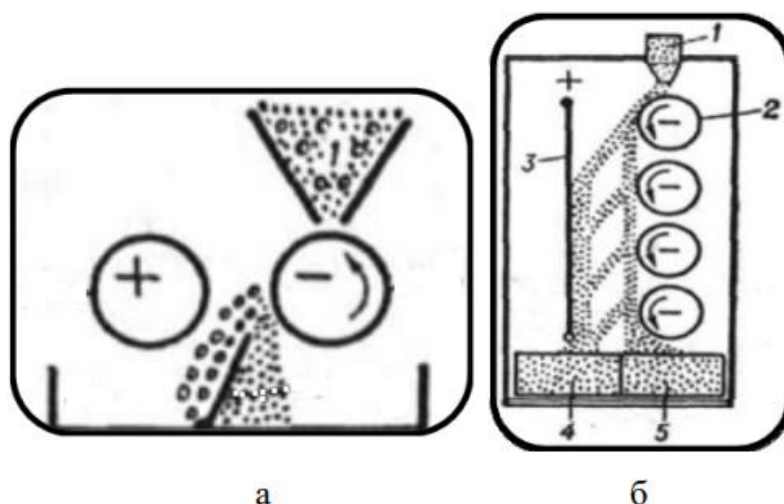


Рис. 3.6. Принцип електростатичної сепарації (а) і схема електростатичного барабанного сепаратора (б): 1 – бункер; 2 – барабан-електрод; 3 – плоский електрод; 4 – приймач відходів; 5 – приймач концентратів.

Магнітна сепарація – технологія розділення матеріалів на основі відмінності їхніх магнітних властивостей (магнітної сприйнятливості) і різної поведінки матеріалів у зоні дії магнітного поля, що змінює гравітаційну траєкторію матеріалів (рис. 4.7).

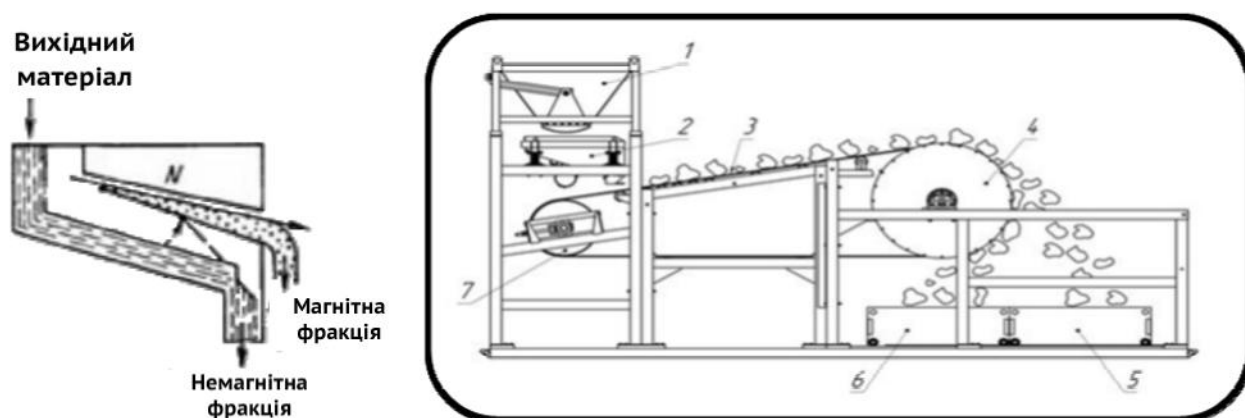


Рис. 3.7. Принцип і пристрій для магнітної сепарації матеріалів: 1 – приймальний бункер; 2 – віброподача; 3 – транспортерна стрічка; 4 – магнітний барабан; 5 – бункер для порожньої породи; 6 – бункер для магнітної фракції; 7 – натяжний барабан

Магнітні сепаратори широко використовуються для відділення феромагнітних металів від кольорових металів та інших немагнітних відходів. Недоліком магнітного поділу є агломерація частинок, унаслідок якої магніт витягує разом із феромагнітними металами і неметалеві включення. Отже, цей метод не дуже ефективний.

Хімічні методи переробки відходів друкованих плат включають піроліз, гідрометалургійний, пірометалургійний, біометалургійний методи.

Піроліз – це термічний процес розкладу органічних речовин у безкисневому середовищі або в атмосфері інертного газу (азоту, аргону), внаслідок якого відбувається руйнування полімерної матриці друкованих плат та часткове виділення цінних компонентів. Цей метод належить до термохімічних технологій переробки електронних відходів, зокрема друкованих плат, і забезпечує розділення органічної та неорганічної фаз, що значно спрощує подальше вилучення металів.

Під час піролізу полімерні компоненти плати (епоксидні смоли, склотекстоліт) нагріваються до температури 350–600 °С без доступу кисню. У результаті відбувається їх термічне розкладання з утворенням:

- летких органічних фракцій (синтез-газу, піролізної рідини – олії),
- твердого залишку, який містить скловолокно, мідь, золото, срібло, нікель та інші метали (рис. 3.8).

Отримані продукти можуть бути або безпосередньо використані, або піддані подальшій обробці (наприклад, гідрометалургічному, пірометалургічному або електрохімічному вилученню металів з твердого залишку).

Переваги піролізу:

- зменшення обсягів відходів – полімерна частина повністю знищується;
- можливість енергетичного відновлення – піролізні гази й рідини мають високу теплоту згоряння;
- підвищення ефективності вилучення металів – тверда фаза після піролізу краще піддається подальшій переробці;

- відсутність відкритого згоряння – що зменшує кількість шкідливих викидів у порівнянні з інсинерацією.



Рис. 3.8. Потік процесу піролізу розкладання й відокремлення твердого джерела металів та летких фракцій

Недоліки піролізу:

- утворення токсичних компонентів у піролізній олії (феноли, бромовані сполуки), що вимагає додаткового очищення;
- необхідність точного контролю температурного режиму для уникнення утворення діоксинів;
- високі капітальні витрати на встановлення піролізних реакторів та систем газоочистки;
- низька комерційна доступність у порівнянні з механічними технологіями.

У країнах ЄС, США, Китаї та Японії проводяться численні дослідження та пілотні проекти з впровадження піролізу для утилізації друкованих плат. Наприклад, піроліз з наступною гідрометалургічною переробкою твердого залишку демонструє до 95% ефективності вилучення міді та понад 90% –

золота. Також розробляються комбіновані підходи, де піроліз поєднується з плазмовою деструкцією шкідливих речовин.

Таким чином, піроліз є перспективним методом хімічної переробки друкованих плат, що дозволяє ефективно розділяти матеріальні фракції, зменшувати токсичне навантаження на довкілля та забезпечувати ресурсозбереження за умов технологічної досконалості та належного контролю процесів.

Гідрометалургійний метод головним чином використовується для переробки плат з метою вилучення металевої фракції. Метод полягає у вилуговуванні металів із застосуванням розчинів кислот і лугів, за яким слідує електрорафінування бажаних металів. Це найпоширеніша хімічна технологія обробки електронних відходів. Вона складається з кількох етапів:

1. Лугове або кислотне вилуговування (leaching): розчинення металів з твердої фази у водному середовищі. Застосовуються такі розчини:

- ацідне вилуговування – використання HCl , H_2SO_4 , HNO_3 або їх комбінацій, іноді з додаванням окисників (H_2O_2 , Cl_2);
- ціанідне вилуговування – для вилучення золота та срібла (NaCN або KCN з окислювачами);
- тіосульфатне вилуговування – як менш токсична альтернатива ціанідному ($\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$).

2. Селективне осадження: вилучення конкретних металів у вигляді осаду при зміні рН або додаванні специфічних реагентів.

3. Сольвентна екстракція або іонний обмін: подальше очищення та концентрація металів у рідкому середовищі.

4. Рециклінг кінцевих металів – шляхом електролізу або термічного відновлення з одержаних концентратів (рис. 3.9).

Переваги гідрометалургійного методу: високий рівень селективності та чистоти металів; відносно низька температура процесів; можливість адаптації до різних видів відходів.

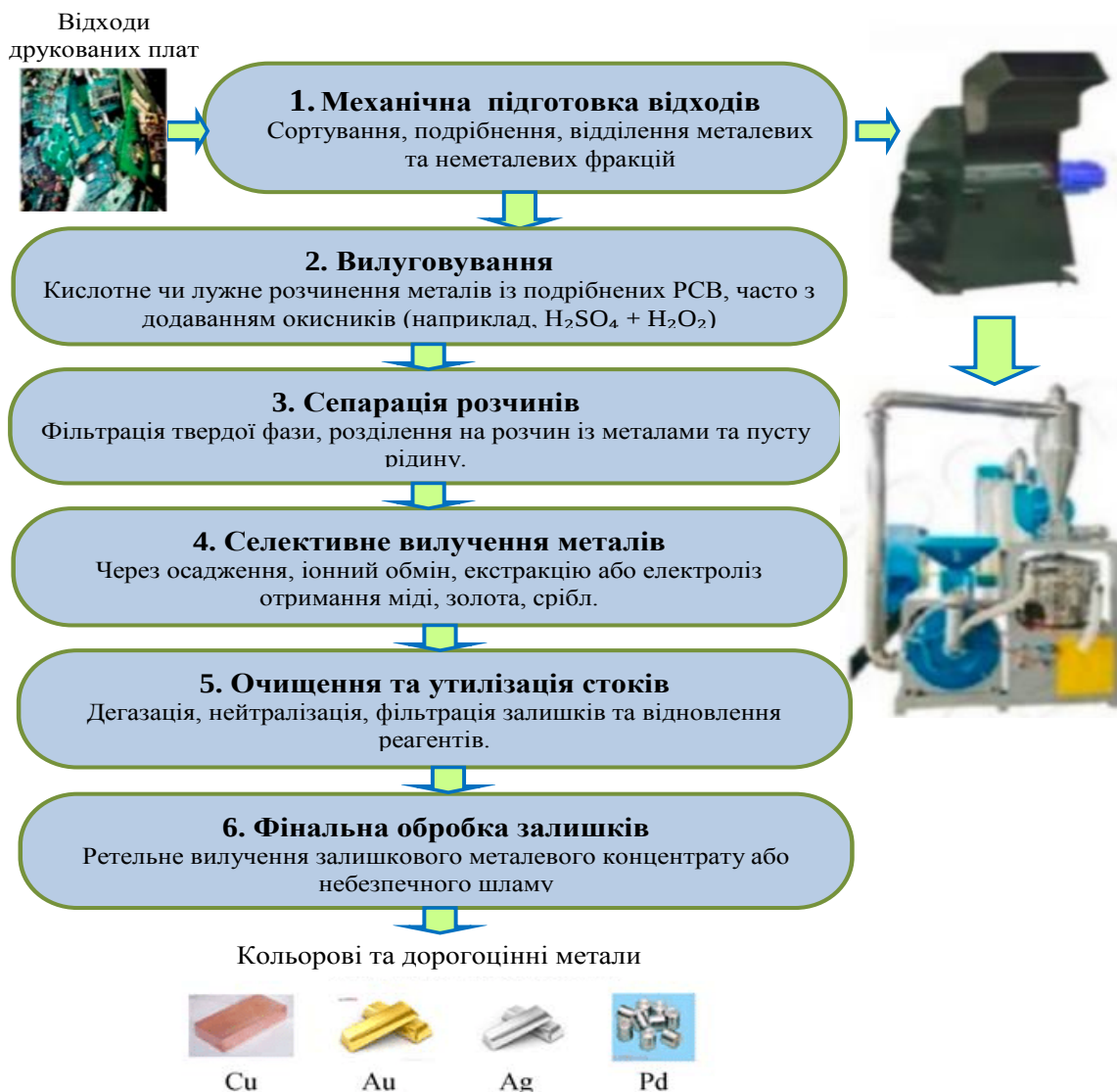


Рис. 3.9. Узагальнений технологічний потік процесу гідрометалургійної переробки друкованих плат

Недоліки гідрометалургійного методу: генерація великої кількості токсичних відходів; необхідність складної системи очищення стічних вод; потенційна небезпека при роботі з кислотами й ціанідами.

Таким чином, гідрометалургійний метод дає змогу відновлювати метали без будь-якої додаткової обробки, решта ж матеріалів у платі перед повторним використанням або захороненням повинні піддаватися додатковій термічній обробці.

Пірометалургійний метод переробки друкованих плат – це процес вилучення металів з використанням високих температур (рис. 3.10).

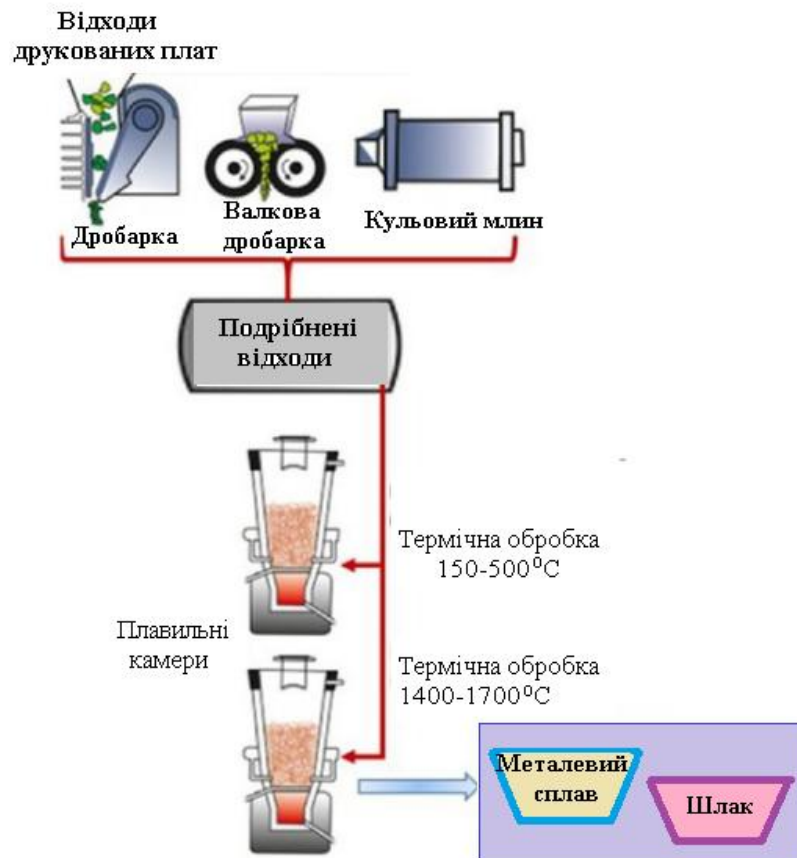


Рис. 3.10. Схематичне зображення пірометалургійного методу переробки друкованих плат

Пірометалургійний процес включає кілька ключових етапів:

1. Попередня підготовка. Друковані плати подрібнюють, видаляють великі компоненти і неметалеві частинки.
2. Плавлення відходів, яке може відбуватися у дугових печах або конвертерах. Подрібнений матеріал завантажується в плавильну піч (температура 800-1700°C). Органіка згорає, неметали випаровуються, а метали розплавляються.
3. Поділ фаз. Утворюється два шари: металевий сплав (мідь, золото, срібло, свинець та ін.) і шлак (оксиди, скло, забруднювачі).
4. Рафінування. З отриманого сплаву метали розділяють і очищають додатковими методами (електроліз, хімічне осадження).

Плюси цього методу: висока ефективність вилучення металів, особливо таких як мідь, олово, золото, паладій. Мінуси: високі енерговитрати, токсичні

викиди, необхідність систем фільтрації. Цей метод застосовують на великих переробних підприємствах і металургійних заводах.

Електрохімічні методи. Ці методи базуються на електролітичному розчиненні або осадженні металів у водному середовищі.

Анодне розчинення – це коли друковані плати або інші деталі під'єднуються як аноди в електролізері, і під дією електричного струму метали переходять у розчин.

Катодне осадження – цінні метали (Cu, Ag, Au, Pd) осаджуються на катоді в чистому вигляді.

Перевагами електрохімічних методів є: висока чистота кінцевого продукту; можливість регенерації електролітів; менша потреба в хімічних реагентах. Недоліки: високі енергетичні витрати; необхідність попередньої підготовки сировини (подрібнення, очищення); обмежена ефективність для комплексних сплавів або змішаних матеріалів.

Біометалургійний метод сепарації застосовують для вилучення дорогоцінних металів і міді з руди вже давно, проте досі він не дуже добре розвинений. Мікроорганізми використовують метали, присутні в зовнішньому середовищі та на поверхні клітин, для своїх внутрішньоклітинних функцій. Кожен тип мікроорганізму має характерну тенденцію переносити конкретний метал у певному середовищі. Біовилуговування і біосорбція загалом два основні напрямки біометалургії, що використовуються для вилучення металів.

Біовилуговування – вибіркове вилучення хімічних елементів з багатокомпонентних сполук за допомогою їх розчинення мікроорганізмами (бактеріями або грибами) у водному середовищі. У біовилуговуванні використовуються різні мікроорганізми, найбільш поширеними з яких є сіро- і залізоокислюючі хемолітотрофні бактерії (*A. thiooxidans*, *Ferrobacillus*, *Leptospirillum ferrooxidans*, *A. ferrooxidans*), помірно термофільні бактерії (*Sulfobacillidium*, *S. thermosulfidooxidans*), ціаногенні бактерії (*Chromobacterium violaceum*), мікроскопічні гриби (*Penicillium simplicissimum*, *Aspergillus niger*, *A. Ficum*) та гетеротрофні бактерії (*Bacillus*, *Pseudomonas*,

Sulfolobus) для окислення металів і переходу їх у розчин. Мікроорганізми окислюють сульфіді або залізо до сірчаної кислоти, яка потім вилуговує метали (наприклад, Cu, Zn, Ni, Co). Тривалість процесу – від кількох днів до тижнів, при цьому потрібен контроль температури, рН, доступу до кисню (рис. 3.11).



Рис. 3.11. Схематичне зображення процесу біовилугування

Переваги біовилугування: екологічність; мінімальні витрати на хімікати; висока селективність. Недоліки: низька швидкість процесу; потреба в стабільних умовах середовища; недостатньо вивчені довгострокові ефекти.

Біосорбція – це спільне використання сорбентів (активне вугілля, порошкоподібні сорбенти) і активного мулу. Біовилуговування успішно застосовується для вилучення дорогоцінних металів і міді з руд протягом багатьох років. Та ж методика може застосовуватися для вилучення міді та інших цінних металів з відходів друкованих плат.

Переваги фізичних методів переробки, таких як магнітні сепаратори, сепаратори, що відокремлюють матеріали залежно від густини, тощо, відносно хімічної переробки полягають у тому, що вони не потребують великих фінансових вкладень, відносно прості, зручні, менше забруднюють навколишнє середовище, потребують менших витрат енергії. Металеві фракції, отримані фізичними методами переробки, можна використовувати в комерційних цілях без значних процедур відновлення. Однак для використання в комерційних цілях неметалевих фракцій вони повинні піддатися хімічній переробці.

Таким чином, фізичні методи переробки є більш економічно вигідними для переробки металевих фракцій, ніж неметалевих. Основна мета хімічних методів переробки, таких як піроліз, полягає у перетворенні полімерів, що містяться в неметалевих фракціях, у хімічну сировину або паливо. Хімічні методи переробки мають переваги в перетворенні бромантіпіренів і витяганні важких металів, що залишилися після фізичних методів переробки.

3.4 Переробка неметалевих фракцій друкованих плат

У процесі утилізації друкованих плат основну увагу часто приділяють вилученню цінних металів, таких як золото, срібло, мідь, паладій тощо. Водночас значну частку маси друкованих плат (від 60 до 75 %) становить неметалева фракція, яка зазвичай представлена епоксидними смолами, скловолокном, термореактивними полімерами, полімерною матрицею, а також домішками паперу, текстоліту та органічних покриттів. Екологічно безпечна та економічно доцільна переробка цих компонентів є важливою складовою концепції циркулярної економіки та зниження негативного впливу електронних відходів на довкілля.

Основні компоненти неметалевої частини друкованих плат наступні:

- скловолокно – до 30-40 % маси, забезпечує механічну жорсткість;
- епоксидна смола – термореактивний полімер, до 25–35 % маси, виконує роль сполучного;

- паперові й текстолітові прошарки – залежно від конструкції плати;
- інші органічні добавки – вогнезахисні речовини (наприклад, бромовані сполуки), барвники тощо.

Через високу термічну та хімічну стабільність ці матеріали важко піддаються традиційним способам переробки. Їх спалювання може спричинити викиди токсичних речовин (наприклад, діоксинів, бромованих сполук), а захоронення – тривале забруднення ґрунту та підземних вод.

Існує декілька методів переробки неметалевої фракції друкованих плат, які розглянуті нижче.

Термічна обробка – включає спалювання або піроліз неметалевих залишків після вилучення металів. Перевагами цього методу є: зменшення об'єму відходів та можливість одержання енергії (у разі піролізу – піролізної олії та газу). До недоліків можна віднести значні викиди токсичних речовин і неможливість вторинного використання скловолокна, яке руйнується під впливом високих температур.

Механічне перероблення – подрібнення та сортування фракцій із подальшим використанням як наповнювачів. Такі наповнювачі можуть використовуватися в будівельних матеріалах як компоненти цементу, плитки, асфальту. Також можливе використання при виробництві полімер-композитів (разом із ПЕТ, ПП, ПВХ). Неметалеві фракції легші, ніж цемент і пісок, їхні гранули набагато менші, отже, вони мають надійнішу мікроструктуру. Механічна міцність матеріалу підвищується в присутності грубих скловолокон. Тож завдяки вищевказаним властивостям неметалеві фракції можуть успішно використовуватися як наповнювач у будівельних матеріалах або для виготовлення клеїв.

Розроблено методику використання неметалевих фракцій друкованих плат у виробництві неметалевих пластин, які можуть використовуватися для отримання композитних плит. Композитні плити знаходять застосування в багатьох галузях, включно з автомобільною промисловістю, меблями, різним обладнанням та оздоблювальними матеріалами.

Фенольні компаунди використовуються у виробництві радіодеталей і кухонного начиння. У зв'язку зі зменшенням лісових ресурсів і підвищенням їх вартості виробники шукають альтернативи дерев'яній підлозі. Неметалеві фракції друкованих плат на паперовій основі здаються хорошим варіантом заміни дерев'яній підлозі.

Переваги механічної переробки – це мінімальний вплив на довкілля та можливість повторного застосування скловолокна. Серед недоліків можна зазначити: обмеженість застосування через залишки токсичних речовин; висока абразивність матеріалу.

Хімічна модифікація та відновлення – цей метод передбачає обробку полімерних залишків реагентами з метою їх розкладу або відновлення властивостей. Нариклад, лужний або кислотний гідроліз епоксидних смол або селективне вилучення бромованих антипіренів. Хімічний метод має такі переваги: видалення токсичних компонентів та можливість підготовки до вторинного використання. Але при ньому виникають певні труднощі, пов'язані із складністю контролю процесів та високою вартістю реагентів (табл. .

Таблиця 3.2. Напрями повторного використання неметалевих фракцій друкованих плат

Спосіб повторного використання	Опис і приклади	Переваги
Будівельна галузь	Наповнювач у цементних і полімерних композитах	Зниження витрат на сировину, вторинне використання
Автомобілебудування	Наповнювач для звукоізоляційних панелей, пластмас	Низька вартість матеріалу
Дорожнє будівництво	Додавання до асфальтобетонних сумішей	Підвищення зносостійкості
Енергетика	Піролізна олія як паливо (у разі термічної переробки)	Часткова енергетична самодостатність процесу
Еко-композити	Створення композитів із полімерних залишків	Зменшення полімерного навантаження на довкілля

Переробка неметалевих фракцій друкованих плат є складною, але надзвичайно важливою задачею в контексті сталого управління електронними відходами. Механічна, термічна та хімічна обробки мають свої переваги та недоліки, а їх комбінація може забезпечити більш повне залучення усіх компонентів друкованих плат до вторинного використання. Ефективність переробки значною мірою залежить від вмісту токсичних речовин, технологічних можливостей та ринкового попиту на вторинну сировину. Пріоритетними є механічні та низькотемпературні методи, що дозволяють уникнути утворення небезпечних викидів та водночас зберігають матеріали для повторного використання.

РОЗДІЛ 4

ОЦІНКА ЕФЕКТИВНОСТІ ТЕХНОЛОГІЙ ПЕРЕРОБКИ ДРУКОВАНИХ ПЛАТ

4.1 Критерії вибору технології переробки друкованих плат

Процес вибору найбільш ефективної технології переробки друкованих плат потребує комплексного підходу, що враховує техніко-економічні, екологічні та соціальні аспекти. Враховуючи складну багатокomпонентну структуру друкованих плат (метали, скловолокно, полімери, домішки), важливо оцінити не лише ефективність вилучення цінних компонентів, а й вплив обраної технології на довкілля, рівень енергоспоживання, вимоги до обладнання та можливості масштабування.

Хімічний та матеріальний склад вихідної сировини. Вибір технології значною мірою залежить від складу друкованих плат. Вміст дорогоцінних металів, типи полімерної матриці, наявність бромованих антипіренів або токсичних домішок можуть зумовити доцільність застосування гідрометалургійного, пірометалургійного або комбінованого підходу. Наприклад, високий вміст міді та олова ефективно вилучається при пірометалургії; золото, паладій, срібло краще вилучаються хімічними (гідрометалургійними) методами; вміст токсичних органічних сполук потребує високотемпературної обробки або попереднього вилучення.

Рівень вилучення металів (ефективність технології). Ключовим критерієм оцінки ефективності є вихід цільових компонентів. Технологія має забезпечувати:

- високий ступінь вилучення кольорових і дорогоцінних металів (>90%);
- мінімізацію втрат матеріалів на стадії подрібнення або шлакування;
- можливість виділення окремих фракцій металів (для подальшого очищення або продажу).

Екологічна безпека. Технологія має забезпечувати мінімальне екологічне навантаження, тобто:

- відсутність або мінімізацію викидів діоксинів, фуранів, важких металів;
- контроль за утворенням токсичних відходів (шлаки, стоки, газоподібні викиди);

- можливість очищення утворених відходів або їх утилізації без шкоди довкіллю.

Енергетичні та ресурсні витрати. Технології повинні бути енергоефективними. До уваги береться: споживання електроенергії та палива на тонну перероблених плат; витрати реагентів, води, допоміжних матеріалів; можливість рекуперації тепла або повторного використання реагентів.

Можливість утилізації неметалевої фракції. Значна частина друкованих плат після вилучення металів – це полімерно-скляна фракція, яка має бути або утилізована (як паливо, наповнювач тощо), або перероблена у вторинні матеріали. Критерій передбачає:

- можливість безпечної переробки неметалевої фракції;
- наявність ринку для вторинних матеріалів;
- відсутність шкідливих залишків (напр., галогеновмісних сполук).

Економічна доцільність. Під час вибору слід враховувати витрати на обладнання, експлуатацію та обслуговування:

- вартість капіталовкладень у встановлення лінії;
- вартість реагентів, обслуговування, персоналу;
- вартість утилізації відходів;
- прибутковість від реалізації вилучених металів та вторинної сировини.

Технологічна складність і масштабованість. Метод повинен відповідати рівню наявної інфраструктури та ресурсів:

- простота інтеграції у наявні виробничі цикли;
- можливість масштабування (від лабораторного до промислового рівня);
- наявність кваліфікованого персоналу для обслуговування технології.

Регуляторні та соціальні аспекти. Вибір технології повинен узгоджуватися з чинними нормативами охорони праці, екології та управління відходами. Також враховується:

- сприйняття громади (особливо при високотемпературних або хімічно-активних процесах);
- вимоги до охорони праці та безпеки;
- можливість створення робочих місць (наприклад, для ручного або напівавтоматичного демонтажу) (табл. 4.1).

Таблиця 4.1. Критерії вибору технології переробки друкованих плат

№	Критерій	Складові
1	Склад і тип друкованої плати	- Багатошарові або одношарові друковані плати. Технології переробки відрізняються за ефективністю залежно від складності конструкції. - Наявність покриттів і припою. Наприклад, наявність свинцю, олова або безсвинцевих сполук впливає на метод переробки. - Частка металів і неметалів визначає доцільність використання певних методів (наприклад, хімічних для вилучення золота і міді).
2	Рівень забруднення та зберігання	- Свіжі плати або ті, що довго зберігалися, їх стан впливає на можливість механічної обробки. - Забруднені плати (мастила, смоли тощо) потребують попереднього очищення, що впливає на вибір технології.
3	Цільові ресурси вилучення	- Наявність певних цінних металів (золото, паладій, срібло): передбачає застосування відповідних технологій переробки. - Мідь і алюміній: можна ефективно витягувати механічними та пірометалургійними способами. - Пластик і склотекстоліт важливий для повторного використання або безпечної утилізації.
4	Екологічні вимоги	- Рівень викидів і відходів. Обираються технології з мінімальними викидами діоксинів і важких металів. - Наявність систем очищення: переробка з попередньою фільтрацією газів і стоків краща. - Відповідність національним і міжнародним стандартам (наприклад Директиві WEEE, Базельська конвенція).
5	Економічна ефективність	- Витрати на обладнання та енергію, це важливий фактор під час вибору між піролізом, вилуговуванням або механічним подрібненням. - Рентабельність: оцінюється співвідношення вартості переробки і вартості витягнутого матеріалу. - Масштаб переробки: великі обсяги виправдовують інвестиції в дорожчі, але ефективніші технології.
6	Технологічна інфраструктура і доступність	- Наявність кваліфікованого персоналу для складних процесів, таких як гідрометалургія або біометалургія. - Технічне оснащення підприємства обмежує або розширює вибір відповідних методів. - Рівень автоматизації сучасних установок дають змогу підвищити безпеку і знизити витрати.
7	Безпека та здоров'я персоналу	- Робота з токсичними речовинами вимагає відповідних засобів захисту та контролю. - Температурний режим. Піроліз вимагає дотримання суворих запобіжних заходів. - Контроль за викидами і пилом, що особливо актуально під час дроблення і термообробки.
8	Можливість комплексного перероблення	Вибір технології також залежить від того, чи можна в рамках одного процесу переробити кілька компонентів плати: метали, пластикову підкладку, елементи пайки.

Рациональний вибір технології переробки друкованих плат повинен ґрунтуватися на балансі між ефективністю вилучення цінних компонентів, безпекою для довкілля, енерговитратами та економічною доцільністю.

Нижче наведена порівняльна таблиця технологій переробки друкованих плат за наведеними вище критеріями (табл. 4.2).

Таблиця 4.2. Порівняльна таблиця технологій переробки відходів друкованих плат за основними критеріями

Критерій	Механічна переробка	Пірометалургія	Гідрометалургія	Біометалургія
Опис методу	Дроблення, сортування, відокремлення металів і неметалів	Термічне розкладання без кисню	Вилуговування кислотами або розчинами	Використання мікроорганізмів для вилучення металів
Цільові матеріали	Мідь, алюміній, пластик	Золото, мідь, срібло, свинець	Золото, мідь, срібло	Золото, мідь, нікель
Ефективність вилучення міді, %	~60	75–90	85–95	60–90
Ефективність вилучення золота, %	<10	60–80	80–95	40–70
Екологічна безпека	Відносно висока	Низька (високі викиди і шлаки)	Середня (потребує нейтралізації кислот і залишків)	Висока (екологічно чистий процес)
Залишкові відходи	Суміші неметалів і склотекстоліту	Шлаки, токсичні гази	Промислові стічні води	Біомаса, залишки розчинів
Енерговитрати	Низькі	Дуже високі	Середні	Низькі
Складність реалізації	Низька	Висока	Середня	Висока (складність у біоконтролі)
Необхідність в очищенні викидів	Мінімальна	Обов'язкова	Обов'язкова	Практично не потрібно
Масштаб переробки	Малий і середній	Великий	Середній і великий	Експериментальний і малий
Вартість обладнання	Низька	Середня	Висока	Середня

За результатами проведеного порівняльного аналізу технологій переробки друкованих плат за різними критеріями можна зробити такі висновки:

- механічна переробка – ефективна на ранньому етапі як попередня обробка. Економічна і безпечна, але з обмеженою ефективністю вилучення цінних металів.

- пірометалургія – підходить для промислових об'ємів і отримання максимальної кількості металів, але вимагає складного очищення викидів і великих витрат.

- гідрометалургія – найточніший метод для вилучення дорогоцінних металів, проте вимагає суворого контролю кислот і реакцій.

- біометалургія – перспективний і екологічний метод, особливо за низьких концентрацій металів, але поки обмежений за масштабованістю і швидкістю.

В умовах зростання обсягів електронних відходів та посилення екологічних вимог важливими є також можливості утилізації всіх компонентів плати, включно з неметалевими фракціями, а також адаптація технологій до місцевих умов (доступність реагентів, інфраструктури, ринків збуту). У практиці все частіше застосовуються комбіновані технології (механічна підготовка + гідрометалургія або пірометалургія), що дозволяють досягати більш повного та безпечного використання ресурсів з електронних відходів.

4.2 Методика оцінки ефективності технологій

Для вибору найбільш доцільної технології переробки електронних відходів, зокрема друкованих плат, необхідне комплексне оцінювання її ефективності з урахуванням екологічних, ресурсозберігаючих, енергоефективних та економічних критеріїв. У цій роботі розроблено інтегральну методику, яка дозволяє об'єктивно порівнювати альтернативні технології обробки друкованих плат (механічної, гідрометалургійної, піролізної та біометалургійної) за низкою показників, що визначають їх вплив на навколишнє середовище, ступінь вилучення цінних компонентів та витрати ресурсів.

Основні етапи методики наведені нижче.

1. Визначення критеріїв оцінки. Основу методики становить система критеріїв, яка відображає ключові аспекти ефективності.

Екологічна ефективність – рівень викидів шкідливих речовин, обсяг утворення залишкових токсичних відходів, потенціал глобального потепління (GWP), утворення діоксинів і фуранів.

Ресурсозберігаюча ефективність – ступінь вилучення цінних металів (Cu, Au, Ag, Pd), обсяг повторно використаних матеріалів.

Енергетична ефективність – це відношення корисного результату (наприклад, кількість вилучених цінних металів або відновленої сировини) до кількості спожитої енергії в процесі переробки. Вона показує, наскільки раціонально використовується енергія у тій чи іншій технології

Економічна ефективність – собівартість переробки 1 т відходів, витрати на утилізацію залишків, вартість обладнання, потенційний прибуток від реалізації вторинної сировини.

2. Нормалізація показників. Оскільки різні критерії мають різні одиниці вимірювання (тонни, гривні, кіловат-години тощо), необхідна їх нормалізація за шкалою від 0 до 1 за формулою:

$$X_{\text{норм}} = (X_{\text{max}} - X_i) / (X_{\text{max}} - X_{\text{min}}) \quad \text{— (для критеріїв, де менше значення—краще);}$$

$$X_{\text{норм}} = (X_i - X_{\text{min}}) / (X_{\text{max}} - X_{\text{min}}) \quad \text{(для критеріїв, де більше значення — краще).}$$

Це дозволяє уникнути викривлень при обчисленні інтегрального (комплексного) показника.

3. Розрахунок індексів ефективності. Індекс екологічної ефективності враховує викиди CO₂-еквіваленту та обсяг утворених небезпечних відходів і визначається за формулою:

$$I_{\text{екол.}} = 1 - \frac{E_i}{E_{\text{макс}}} \cdot \omega_1 + \frac{W_i}{W_{\text{макс}}} \cdot \omega_2, \quad (4.1)$$

де E_i – викиди CO₂ від i -того методу (кг);

W_i – обсяг небезпечних відходів (л);

$E_{\text{макс}}, W_{\text{макс}}$ – найгірші (максимальні) значення серед усіх методів;

ω_1, ω_2 – вагові коефіцієнти (0,5 і 0,5 для рівноважного впливу)

Індекс ресурсозбереження оцінює рівень вилучення цінних металів:

$$I_{\text{ресурс.}} = \frac{M_i}{M_{\text{макс}}}, \quad (4.2)$$

де M_i – загальна маса вилучених цінних металів (наприклад, міді й золота у кг);

$M_{\text{макс}}$ – максимальна маса вилучених цінних металів серед усіх методів.

Можна враховувати окремо кожен метал, і об'єднувати через вагові коефіцієнти (якщо золото важливіше, ніж мідь).

Індекс енергоефективності визначається за формулою:

$$I_{\text{енергоеф.}} = 1 - \frac{P_i - P_{\text{мін}}}{P_{\text{макс}} - P_{\text{мін}}}, \quad (4.3)$$

де P_i – енерговитрати i -того методу (кВт·год/т);

$P_{\text{макс}}$, $P_{\text{мін}}$ – відповідно максимальні та мінімальні енергозатрати серед усіх розглянутих технологій (кВт·год/т).

Це нормалізоване значення, де найменші енергетичні витрати дають максимальний індекс. Низький індекс відповідає значному споживанню енергії, що може спричинити високі витрати та додаткове навантаження на довкілля.

Комплексний індекс ефективності визначається за формулою:

$$K_{\text{еф}} = \frac{I_{\text{екол}} + I_{\text{ресурс}} + I_{\text{енергоеф}}}{3}, \quad (4.4)$$

Показник економічної ефективності технологій переробки друкованих плат розглядається окремо у розділі 5.

4. Аналіз результатів та вибір найбільш ефективної технології. На основі порівняльного аналізу інтегральних показників робиться висновок щодо найбільш ефективної технології в умовах конкретного регіону.

4.3 Результати оцінки ефективності технологій переробки відходів друкованих плат

У рамках дослідження застосовано описану методику для аналізу чотирьох основних технологій переробки друкованих плат:

- механічне подрібнення + сортування;
- гідрометалургійна переробка;
- пірометалургійна переробка;

- біометалургійний метод (біовилугування металів за допомогою бактерій роду *Acidithiobacillus ferrooxidans*, *A. thiooxidans*).

Для кожного варіанта з використанням наукових джерел [35, 54, 62, 63, 65, 66] зібрані техніко-економічні дані (енергоспоживання, витрати, вихід цінних компонентів, утворення токсичних залишків), які нормалізовані і оброблені за формулами (4.1)-(4.4). Це дозволяє обґрунтовано зробити вибір на користь найбільш доцільної технології з точки зору екології та ресурсозбереження.

Результати розрахунків та оцінки ефективності чотирьох технологій переробки друкованих плат згідно з критеріями розглянутої методики наведено в табл. 4.2 для умовної партії 1 тонни електронних відходів. Графічно результати оцінки ефективності технологій переробки друкованих плат наведено на рис.4.5-рис.4.8.

За результатами проведеного порівняльного аналізу ефективності технологій переробки друкованих плат технологія біометалургії отримала найвищий комплексний індекс (0,85), що свідчить про її збалансовану ефективність в усіх трьох аспектах. Біометалургія демонструє найкраще поєднання екологічної безпеки та помірного рівня вилучення ресурсів, проте потребує тривалого часу і чутлива до умов середовища. Механічний метод залишається найбільш енергоефективним, але поступається за ресурсозбереженням, він є найпростішим, але має низький рівень вилучення дорогоцінних металів. Пірометалургія, попри гарне вилучення металів, має критично низьку енергоефективність і екологічність. Це ефективний метод для вилучення металів і зменшення об'єму відходів, однак вимагає значних енергозатрат і створює ризик вторинного забруднення. Гідрометалургія показує найвищу ефективність вилучення металів, але має високі енерговитрати та екологічні ризики, так як цей процес супроводжується утворенням шкідливих хімічних відходів (табл. 4.3).

Таблиця 4.2. Оцінка ефективності технологій переробки друкованих плат (на 1 тонну відходів друкованих плат)

Показник	Механічний метод	Гідрометалургія	Пірометалургія	Біометалургія
Принцип	Подрібнення, сортування, відокремлення металів і неметалів	Вилуговування кислотами або розчинами	Високотемпературне плавлення для вилучення металів	Використання мікроорганізмів для вилучення металів
Температура процесу, °C	20–50	25–90	800–1700	25–35
Тривалість переробки	2-6 годин	8-24 години	4-10 годин	7-21 днів
Маса вилученої міді, кг	600	900	850	800
Маса вилученого золота, г	10	250	180	140
Енерговитрати, кВт·год	150	400	950	200
Викиди CO ₂ -еквіваленту, кг	40	250	1100	35
Об'єм небезпечних відходів, л	20	600	450	50
Індекс екологічної ефективності (0–1)	0,85	0,65	0,40	0,90
Індекс ресурсозбереження (0–1)	0,55	0,90	0,80	0,75
Індекс енергоефективності (0–1)	1,00	0,68	0,00	0,89
Комплексний індекс ефективності ($K_{\text{еф}}$)	0,80	0,74	0,40	0,85

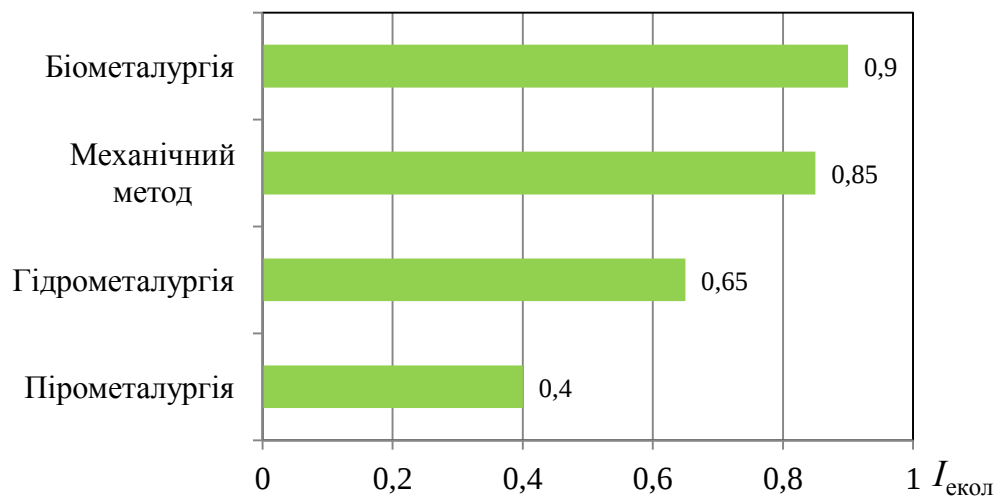


Рис. 4.5. Індекс екологічної ефективності

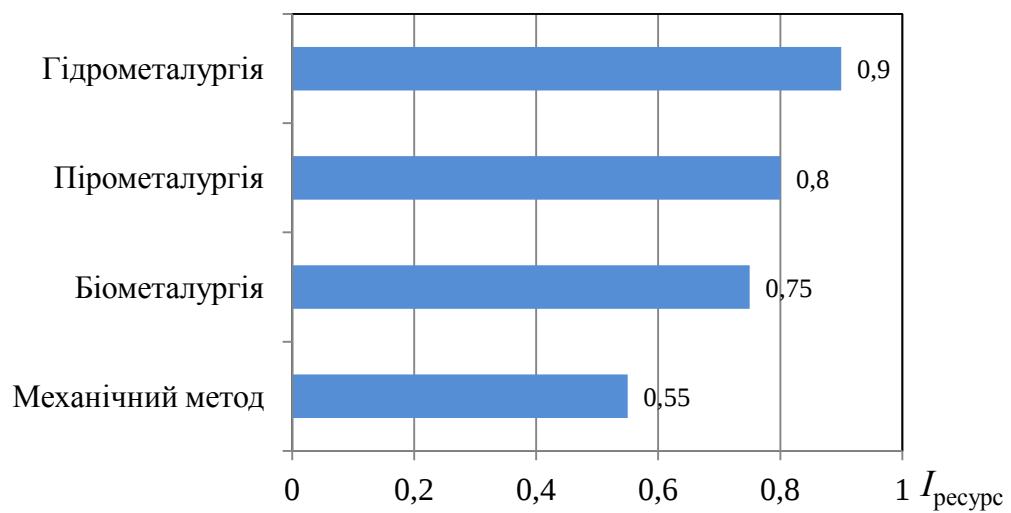


Рис. 4.6. Індекс ресурсозбереження

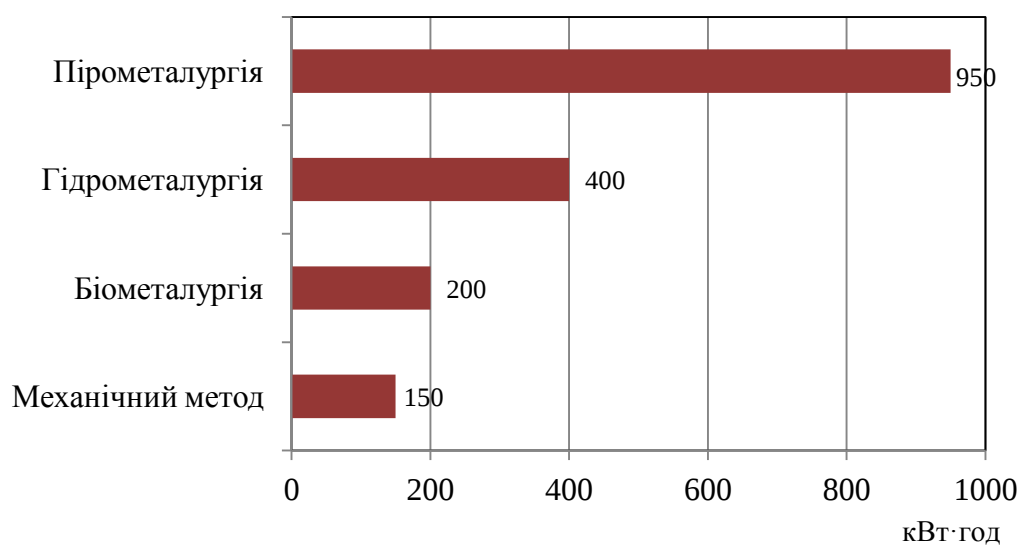


Рис. 4.7. Енергетичні витрати на 1 тонну відходів друкованих плат

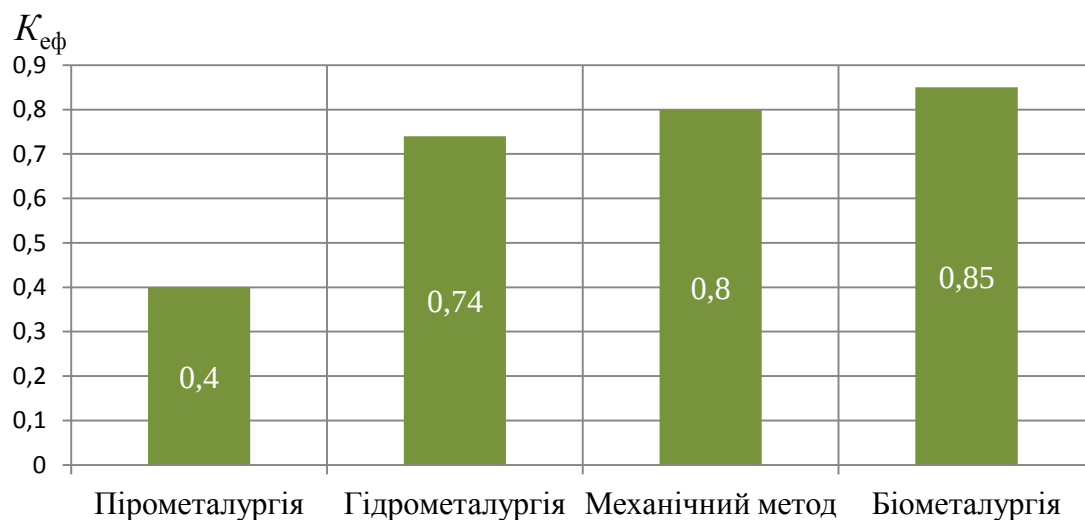


Рис. 4.8. Комплексний індекс ефективності технологій переробки відходів друкованих плат

Таблиця 4.3. Остаточне порівняння досліджуваних технологій переробки друкованих плат

№	Технологія переробки	Переваги	Особливості
1	Механічна переробка	Ефективна переробка металу та пластику	Деякі втрати дорогоцінних металів під час поділу
2	Гідрометалургія	Високі показники вилучення металів, селективне вилучення	Використання небезпечних хімікатів, необхідна належна обробка відходів
3	Пірометалургія	Ефективна при відновленні кольорових металів	Викиди шкідливих речовин, небезпечних побічних продуктів
4	Біометалургія	Екологічно чистий метод, можливість вибіркового відновлення металів	Потребує тривалого часу і чутлива до умов середовища. Обмежене промислове застосування.

Висновки за результатами оцінки ефективності технологій переробки друкованих плат свідчать про те, що жодна з існуючих технологій не є універсальною та остаточно переважною. Кожен метод – механічний, гідрометалургійний, пірометалургійний або комбінований – має свої переваги та обмеження залежно від складу відходів, доступних ресурсів, екологічних вимог і економічних умов. Найвищу ефективність у вилученні дорогоцінних

металів демонструють гідрометалургійні процеси, тоді як пірометалургія є доцільною при обробці великих обсягів змішаних плат. Механічні методи є важливим етапом попередньої підготовки. Оптимальним напрямом у сучасних умовах є впровадження комбінованих технологій, які дозволяють збалансувати ефективність, екологічність і вартість переробки.

РОЗДІЛ 5

ЕКОНОМІЧНІ АСПЕКТИ УПРАВЛІННЯ ЕЛЕКТРОННИМИ ВІДХОДАМИ

5.1 Забезпечення принципів циркулярної економіки під час управління та поводження з електронними відходами

Циркулярна економіка або економіка замкненого циклу – це система, в якій усі матеріали та компоненти завжди підтримуються в найвищій цінності, а відходи не передбачені в системі. Її можна легко уявити як протилежність сучасній лінійній економіці. Цього можна досягти за допомогою різних бізнес-моделей, включно з продуктом як послугою, спільним використанням активів, подовженням терміну служби і, нарешті, переробкою. Щоб побудувати циркулярну економіку для електроніки, необхідно розглянути різні аспекти (рис. 5.1).



Рис. 5.1. Забезпечення принципів циркулярної економіки під час управління та поводження з електронними відходами

Дизайн. Продукти повинні розроблятися з можливістю повторного використання, довговічними і, в кінцевому підсумку, придатними для безпечного перероблення. Багато компаній взяли на себе глобальні зобов'язання з проектування ланцюжка створення вартості електроніки без відходів, а інші старанно працювали над виключенням небезпечних матеріалів зі своєї продукції. Ці види досвіду повинні бути поширені по всій галузі, створюючи конкурентний простір з відкритим вихідним кодом для співпраці.

Використання міцних конструкцій може гарантувати, що електронні пристрої служитимуть довше. Конфігурації повинні враховувати завершення терміну служби товару, а також сприяти розбиранню і повторному використанню. Використання «системного підходу» та перебудова всього життєвого циклу електронного пристрою для економії замкненого також може створити більшу цінність у системі.

Системи викупу або повернення. Дедалі частіше виробники електроніки можуть пропонувати системи викупу або повернення старого обладнання. Фінансове стимулювання споживача і гарантія того, що його дані будуть належним чином оброблені. Експертиза в користувацькому досвіді могла б бути використана, щоб зробити процес закінчення терміну служби більш гладким.

Удосконалене перероблення та повторне використання. Компанії та уряди можуть працювати над створенням системи для виробництва за замкнутим циклом, в якій збираються всі старі продукти, а потім матеріали або компоненти реінтегруються в нові. Це потребуватиме нових фінансових стимулів і політичних важелів, а також лідерства приватного сектора. Сектор переробки також потребує оновлення; у деяких випадках перероблені матеріали не мають достатньої якості для використання в нових електронних продуктах. Країни також мають цілі, пов'язані з цим. У Китаї до 2025 року заплановано 20% повторного використання всіх нових електронних товарів.

Довговічність і ремонт. Утилізація електротехнічних та електронних товарів після споживання буде недостатньою для боротьби з цією проблемою.

Суспільство має бути в змозі отримати вигоду з добре розроблених, довгоживучих продуктів. Довговічність може бути додатково збільшена, коли обладнання обслуговується, ремонтується і відновлюється. Компанії повинні бути готові відремонтувати обладнання, яке вони продають, що також було наказано законом у деяких юрисдикціях. Електротовари, що були у вжитку, коштують більше, ніж окремі компоненти, які, знову ж таки, коштують на порядок більше, ніж лише матеріали. Отже, вторинне використання і збір компонентів становлять велику можливість.

Видобуток ресурсів у міських умовах (Urban mining). Уже зараз один переробник у Китаї виробляє більше кобальту, ніж усі шахти країни за один рік. Циркулярна економіка для електроніки максимізує кількість цінних електронних відходів, які повертаються у виробництво нових електронних продуктів і компонентів. Щоб досягти цього, більшій кількості країн, особливо у світі, що розвивається, необхідно буде ухвалити законодавство про електронні відходи, як-от запровадження розширеної відповідальності виробників, і створити офіційну галузь переробки. Це не тільки пом'якшить деякі з найгірших наслідків, але також створить величезні можливості для економічного зростання і гідної роботи.

Зворотний ланцюжок поставок. Коли продукт більше не може бути використаний, матеріали потрібно зібрати і відправити назад для повторного залучення у виробництво. Це відомо, як зворотний ланцюжок поставок. Однак, на відміну від прямого ланцюжка поставок, переміщення та обробка матеріалів не компенсуються за рахунок вартості готового продукту, наділеного споживчими характеристиками. Натомість переробники мусять покладатися лише на вартість сировини, і тому бізнес-процеси потребують високоефективної та економічної моделі зворотного ланцюга постачання, яка є безпечною та відповідальною і гарантує, що матеріали не надходять до неформального сектору.

Електроніка як послуга. Поточні моделі лізингу та оренди зі щомісячними контрактами для смартфонів і навіть деяких телевізорів дають

змогу глобальним споживачам отримувати доступ до новітніх технологій, особливо до продуктів з коротким терміном служби і без високих початкових витрат. Доступ до інновацій та оновлень не слабшає, а бар'єри для користувачів також знизилися.

Завдяки цій новій моделі володіння у виробника з'являється стимул забезпечити оптимальне використання всіх ресурсів протягом життєвого циклу пристрою. Це включає варіанти, коли прийшов час, для повторного використання іншим споживачем або переробки. Однак, щоб ця схема працювала, життєво важливо, щоб продукти залишалися як послуги до завершення їхнього використання, інакше вони ризикують бути проданими і потрапити до неформального сектору. Існує також стимул до того, щоб якомога довше зберігати цінність продуктів, подовжувати термін служби пристроїв, ремонтувати їх за потреби, унеможливлювати відходи та зменшувати вплив, який електронні продукти чинять на навколишнє середовище.

Замість одноразової операції бізнес-модель перемикається на постійну послугу та економію на підписці. Це створює набагато тісніші та міцніші відносини з клієнтами. Це вже сталося з побутовими модемами в деяких країнах. Наприклад, Fairphone, компанія з виробництва мобільних телефонів у Нідерландах, запустила «Fairphone-as-a-Service», а у Dell у США вже є «Персональний комп'ютер як послуга» [26].

Як зазначається в нещодавньому звіті Фонду Еллен Макартур, зростання хмарних обчислень також має неймовірний потенціал, коли мова заходить про електроніку. Переміщуючи можливості пристроїв від фактично придбаного обладнання до віддалених центрів обробки даних, апаратні можливості стають менш важливими, ніж можливості підключення та обслуговування. Своєю чергою, це може збільшити цикли використання продукту та зменшити кількість відходів у системі [40].

Економічні вигоди від використання економічної моделі замкнутого циклу в електроніці та електротехніці можуть бути величезними. Циркулярна модель для електроніки може знизити витрати для споживачів на 7% до 2030

року і на 14% до 2040 року. Оскільки електронні відходи є зростаючим ресурсом, а також з огляду на брак ресурсів і коливання цін на деякі метали та мінерали на горизонті, спостерігається зростаючий економічний ефект від вилучення цих цінних ресурсів. Це, в поєднанні з кращими конструкціями і технологіями для вилучення ресурсів, забезпечить більш вигідний вихід матеріалів, що зміцнить ситуацію.

Електронні відходи містять низку рідкісних і цінних видів сировини, більшість яких нині не підлягає переробці. Тому світовий ринок управління електронними відходами, ймовірно, зростатиме як з фінансових, так і з екологічних причин. У 2020 році обсяг ринку оцінювався в 49 880 млн. доларів США, і, за прогнозами, до 2028 року він збільшиться майже втричі і складе 143 870 млн. доларів США. Переробка лише одного мільйона використаних мобільних телефонів може дати близько 772 фунтів срібла, 35 000 фунтів міді, 75 фунтів золота та 33 фунти паладію [45].

У багатьох країнах підприємці в галузі поводження з електронними відходами та кооперативи працівників, що займаються електронними відходами, розширюють операції з переробки електронних відходів та експериментують з новими та всеосяжними бізнес-моделями для ефективного управління електронними відходами. Вони вже створили тисячі гідних робочих місць у безпечних умовах для тих, хто раніше працював у неформальному секторі в ланцюжку створення вартості електронних відходів. За правильного поєднання політики та доступу до фінансів такі підходи можуть бути розширені та масштабовані, створюючи додаткові робочі місця для десятків, якщо не сотень тисяч працівників у циркулярній економіці.

За правильного розвитку використання циркулярної економіки для сектору електроніки та електронних відходів може створити мільйони робочих місць по всьому світу. Дехто може виконувати низькооплачувану і низькокваліфіковану роботу, оскільки в систему потрапляє більше електронних відходів, але з часом це зміниться з появою широкого спектра робочих місць. Це призведе до необхідності, наприклад, нових дизайнерів, економістів з

бізнес-процесів замкненого циклу і фахівців з міського видобутку ресурсів, а також співробітників EaaS (електроніка як послуга).

Таким чином, управління електронними відходами – це не лише питання захисту довкілля, але й економічна можливість для сталого розвитку, формування циркулярної економіки та підвищення ресурсної безпеки країни

5.2 Порівняння економічної ефективності досліджуваних технологій переробки друкованих плат

Економічна ефективність є одним із ключових критеріїв вибору технології переробки друкованих плат, оскільки вона визначає доцільність інвестицій та стійкість технології у довгостроковій перспективі.

Електронні відходи можна розглядати як економічний ресурс. За даними досліджень, у 1 тонні мобільних телефонів міститься більше золота, ніж у 1 тонні золотої руди. Вартість металів, що можуть бути вилучені з тонни друкованих плат, оцінюється у тисячі доларів США. Тому електронні відходи дедалі частіше розглядаються як міська руда (*urban mining*). Переробка цих матеріалів дозволяє зменшити витрати на видобуток первинних ресурсів, зменшити енергоспоживання та знизити рівень викидів парникових газів.

До основних витрат, пов'язаних із поводженням з електронними відходами, належать:

- витрати на збирання, сортування, транспортування;
- капітальні витрати на обладнання для переробки;
- експлуатаційні витрати (електроенергія, реагенти, робоча сила);
- витрати на екологічний моніторинг та утилізацію залишків.

Витрати значною мірою залежать від обраної технології переробки. Наприклад, пірометалургія є енергоємною, але ефективною при великих обсягах. Гідрометалургія потребує витрат на хімічні реагенти та захист довкілля.

Основними джерелами доходів є:

- реалізація вилучених дорогоцінних металів;
- продаж вторинної сировини (пластиків, скла, міді);
- надходження від участі в розширеній відповідальності виробників;
- економія на захороненні та імпорті ресурсів.

Рентабельність переробки залежить від ступеня вилучення корисних компонентів, обсягів обробки, ринкової вартості металів та ефективної організації логістики.

Порівняння економічної ефективності чотирьох досліджуваних технологій переробки відходів друкованих плат (механічна переробка, гідрометалургія, пірометалургія та біометалургія) виконано з урахуванням витрат, рентабельності та потенційного прибутку від реалізації вторинних ресурсів. Аналіз виконувався з використанням даних наукових літературних джерел [30, 62, 27, 28] на базі стандартної операційної рентабельності та типового рівня витрат (табл. 5.1, рис. 5.2).

Таблиця 5.1. Порівняння рентабельності технологій переробки друкованих плат
(на 1 тону сировини)

Показник	Механічний метод	Гідрометалургія	Пірометалургія	Біометалургія
Капітальні витрати (\$/т)	Низькі (500–1 000)	Середні (1 000–3 000)	Високі (4 000–8 000)	Низькі (500–1 500)
Орієнтовні поточні витрати (\$/т)	600	1 800	3 500	1 200
Потенційний дохід від реалізації ресурсів (\$/т)	650	2 200	3 800	1 600
Чистий прибуток (\$/т)	50	400	300	400
Рентабельність витрат (%)	8,3 %	22 %	8,6 %	33 %
Мінімальний обсяг переробки для беззбитковості (т/рік)	~150	~80	~300	~100
Вартість запуску невеликої лінії (\$)	50 000	120 000	250 000	80 000

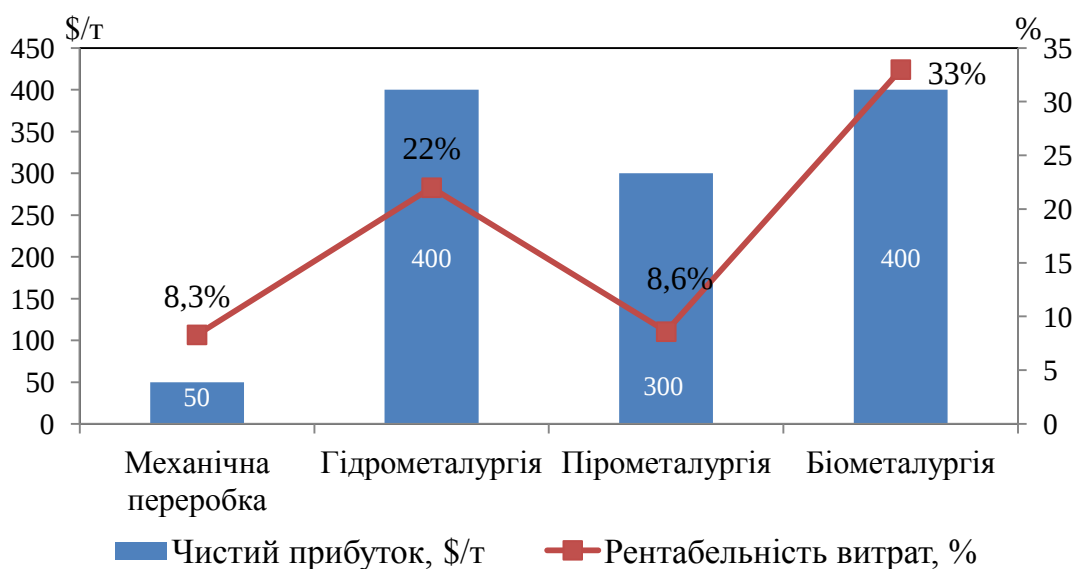


Рис. 5.2. Чистий прибуток і рентабельність витрат технологій переробки друкованих плат

За результатами проведеного аналізу можна відзначити, що біометалургія має найвищу рентабельність за рахунок порівняно низьких витрат, проте процес повільніший. Гідрометалургія – оптимальний баланс доходів і витрат, особливо для видобутку золота, срібла та міді. Пірометалургія прибуткова лише при великих масштабах і високих цінах на метали. Механічний метод має найнижчу рентабельність, а іноді буває збитковий без подальшої переробки концентрату іншими способами.

Порівняння демонструє, що жодна технологія не є універсальною. Вибір має базуватися на балансі між початковими витратами, доступністю сировини, екологічними вимогами та рівнем технологічної готовності підприємства. Для малих підприємств доцільними є механічна або біометалургійна переробка, тоді як для великих – пірометалургія або гідрометалургія з глибоким вилученням металів. Рациональним підходом є поєднання кількох технологій у єдиному комплексі.

РОЗДІЛ 6

ОХОРОНА ПРАЦІ

6.1 Основні положення

Охорона праці є невід'ємною складовою безпечної та ефективної діяльності у сфері поводження з електронними відходами. Процеси збирання, сортування, розбирання, переробки та утилізації електронного й електричного обладнання пов'язані з підвищеним рівнем виробничих ризиків, що зумовлює необхідність впровадження комплексу організаційних, технічних і санітарно-гігієнічних заходів, спрямованих на збереження життя і здоров'я працівників. Електронні відходи містять значну кількість небезпечних і шкідливих речовин, зокрема важкі метали (свинець, кадмій, ртуть), токсичні хімічні сполуки, бромовані антипірени, а також елементи підвищеної пожежо- та вибухонебезпеки, такі як літій-іонні акумулятори. Неналежне поводження з такими відходами може призвести до професійних захворювань, травматизму, отруєнь, а також аварійних ситуацій на виробництві.

Основними принципами охорони праці під час утилізації електронних відходів є пріоритет життя і здоров'я працівників над результатами виробничої діяльності, профілактика виробничого травматизму та професійних захворювань, комплексний підхід до оцінки ризиків і впровадження сучасних безпечних технологій переробки. Важливу роль відіграє також дотримання вимог чинного законодавства у сфері охорони праці, екологічної та пожежної безпеки.

Організація безпечних умов праці на підприємствах з утилізації електронних відходів передбачає належне планування виробничих процесів, застосування технічно справного обладнання, забезпечення ефективної вентиляції, освітлення та мікроклімату виробничих приміщень. Не менш важливим є обов'язкове навчання персоналу з питань охорони праці, проведення інструктажів, а також регулярний контроль за дотриманням правил безпеки під час виконання робіт.

Таким чином, забезпечення охорони праці при утилізації електронних відходів є необхідною умовою сталого функціонування підприємств цієї галузі та важливим чинником зменшення негативного впливу виробничої діяльності на здоров'я працівників і навколишнє середовище. Охорона праці є невід'ємною складовою безпечної та ефективної діяльності у сфері поводження з електронними відходами. Процеси збирання, сортування, розбирання, переробки та утилізації електронного й електричного обладнання пов'язані з підвищеним рівнем виробничих ризиків, що зумовлює необхідність впровадження комплексу організаційних, технічних і санітарно-гігієнічних заходів, спрямованих на збереження життя і здоров'я працівників.

Електронні відходи містять значну кількість небезпечних і шкідливих речовин, зокрема важкі метали (свинець, кадмій, ртуть), токсичні хімічні сполуки, бромовані антипірени, а також елементи підвищеної пожежо- та вибухонебезпеки, такі як літій-іонні акумулятори. Неналежне поводження з такими відходами може призвести до професійних захворювань, травматизму, отруєнь, а також аварійних ситуацій на виробництві.

Основними принципами охорони праці під час утилізації електронних відходів є пріоритет життя і здоров'я працівників над результатами виробничої діяльності, профілактика виробничого травматизму та професійних захворювань, комплексний підхід до оцінки ризиків і впровадження сучасних безпечних технологій переробки. Важливу роль відіграє також дотримання вимог чинного законодавства у сфері охорони праці, екологічної та пожежної безпеки.

Організація безпечних умов праці на підприємствах з утилізації електронних відходів передбачає належне планування виробничих процесів, застосування технічно справного обладнання, забезпечення ефективної вентиляції, освітлення та мікроклімату виробничих приміщень. Не менш важливим є обов'язкове навчання персоналу з питань охорони праці, проведення інструктажів, а також регулярний контроль за дотриманням правил безпеки під час виконання робіт.

Таким чином, забезпечення охорони праці при утилізації електронних відходів є необхідною умовою сталого функціонування підприємств цієї галузі та важливим чинником зменшення негативного впливу виробничої діяльності на здоров'я працівників і навколишнє середовище.

6.2 Аналіз небезпечних та шкідливих виробничих факторів при демонтажу електронних та електричних приладів

Процеси демонтажу електронних та електричних приладів належать до робіт підвищеної небезпеки, оскільки супроводжуються впливом комплексу шкідливих і небезпечних виробничих факторів на працівників. Характер і рівень цих факторів залежать від типу обладнання, способів демонтажу, технічного стану приладів, а також рівня механізації та організації виробничого процесу.

Одними з найбільш небезпечних є **хімічні виробничі фактори**, пов'язані з наявністю у складі електронних приладів токсичних речовин. Під час розбирання корпусів, друкованих плат, акумуляторів та інших компонентів можливе виділення парів і пилу, що містять свинець, кадмій, ртуть, нікель, а також бромовані органічні сполуки. Потрапляння цих речовин в організм людини може спричинити гострі та хронічні отруєння, ураження дихальної системи та розвиток професійних захворювань.

До **фізичних шкідливих факторів** належать підвищений рівень шуму та вібрації, які виникають під час використання електроінструментів, механічних установок і обладнання для розбирання. Тривалий вплив шуму негативно впливає на слуховий апарат, а вібрація може спричиняти порушення опорно-рухового апарату та серцево-судинної системи. Також у процесі демонтажу можливий вплив підвищених або знижених температур, недостатнього або надмірного освітлення робочих місць.

Суттєву небезпеку становлять **механічні фактори**, пов'язані з ризиком отримання травм. Під час демонтажу електронних приладів існує ймовірність

порізів гострими краями металевих і пластикових елементів, ураження уламками скла, а також заземлення або ударів рухомими частинами обладнання. Особливу небезпеку створюють роботи, що виконуються вручну без належного інструменту та засобів індивідуального захисту.

Окрему групу становлять **електричні небезпечні фактори**, пов'язані з можливістю ураження електричним струмом. Демонтаж приладів, які не були попередньо відключені від джерел живлення або містять залишкову напругу в конденсаторах, може призвести до електротравм різного ступеня тяжкості. Порушення правил електробезпеки значно підвищує ризик аварійних ситуацій на робочому місці.

Крім того, під час демонтажу електронних та електричних приладів існує **пожежна та вибухова небезпека**, зокрема при пошкодженні літій-іонних акумуляторів, які здатні до самозаймання або вибуху. Неправильне поводження з такими компонентами може призвести до пожеж, опіків і значних матеріальних збитків.

Таким чином, аналіз небезпечних та шкідливих виробничих факторів свідчить про необхідність комплексного підходу до організації охорони праці під час демонтажу електронних та електричних приладів, що включає впровадження технічних засобів безпеки, дотримання регламентів виконання робіт, використання засобів індивідуального захисту та проведення систематичного навчання персоналу.

6.3 Розрахунок системи освітлення виробничого приміщення з використанням світлодіодних ламп

Раціональне освітлення виробничих приміщень є одним з основних чинників забезпечення безпечних і комфортних умов праці. Недостатній або нерівномірний рівень освітлення під час демонтажу електронних та електричних приладів може призвести до зорового перенапруження, підвищення рівня втоми працівників, а також зростання ризику виробничого

травматизму. У зв'язку з цим особливої уваги потребує правильний вибір і розрахунок системи освітлення.

Для виробничого приміщення, у якому виконуються роботи з демонтажу електронних та електричних приладів, відповідно до чинних нормативних документів, нормована освітленість робочої поверхні повинна становити не менше 300 лк.

Вихідні дані для розрахунку:

Довжина приміщення, $A = 12$ м

Ширина приміщення, $B = 8$ м

Висота приміщення, $H = 3,5$ м

Висота робочої поверхні, $h_p = 0,8$ м

Тип світильників — світлодіодні LED

Світловий потік одного світильника, $\Phi = 4000$ лм

Коефіцієнт запасу, $k = 1,5$

Коефіцієнт використання світлового потоку, $\eta = 0,6$

Площа приміщення визначається за формулою:

$$S = A \cdot B$$

$$S = 12 \cdot 8 = 96 \text{ м}^2$$

Необхідна кількість світильників визначається за формулою:

$$N = (E \cdot S \cdot k) / (\Phi \cdot \eta)$$

де E – нормована освітленість, лк;

S – площа приміщення, м^2 ;

k – коефіцієнт запасу;

Φ – світловий потік одного світильника, лм;

η – коефіцієнт використання світлового потоку.

Підставляючи числові значення, отримаємо:

$$N = (300 \cdot 96 \cdot 1,5) / (4000 \cdot 0,6)$$

$$N = 43200 / 2400 = 18 \text{ світильників}$$

Отже, для забезпечення нормативного рівня освітленості у виробничому приміщенні необхідно встановити 18 світлодіодних світильників, рівномірно розміщених по стелі.

Застосування світлодіодних ламп дозволяє забезпечити стабільний рівень освітленості, зменшити енергоспоживання, підвищити надійність системи освітлення та знизити експлуатаційні витрати. Крім того, LED-освітлення не містить шкідливих речовин, не мерехтить і має тривалий термін служби, що позитивно впливає на умови праці та безпеку персоналу.

6.4 Заходи техніки безпеки при демонтажу електронних та електричних приладів

Забезпечення техніки безпеки під час демонтажу електронних та електричних приладів є обов'язковою умовою запобігання виробничому травматизму, професійним захворюванням та аварійним ситуаціям. Дотримання встановлених правил і вимог безпеки дозволяє мінімізувати негативний вплив небезпечних і шкідливих виробничих факторів на працівників.

Перед початком виконання робіт з демонтажу електронних та електричних приладів працівники повинні пройти вступний та первинний інструктаж з охорони праці, а також бути ознайомленими з технологічними картами виконання робіт. До робіт допускаються лише особи, які пройшли відповідне навчання, медичний огляд та мають необхідну кваліфікацію.

Під час демонтажу електронних та електричних приладів обов'язковим є повне відключення обладнання від джерел електроживлення. Особливу увагу слід приділяти наявності залишкової напруги в електричних ланцюгах та конденсаторах, які перед початком робіт повинні бути розряджені. Забороняється виконувати демонтаж приладів, що перебувають під напругою.

Робоче місце повинно бути організоване таким чином, щоб забезпечувати зручність і безпеку виконання операцій. Інструменти та пристрої мають бути

справними, ізольованими та відповідати характеру виконуваних робіт. Забороняється використання несправного або саморобного інструменту. Робочі поверхні повинні бути стійкими, чистими та добре освітленими.

Під час виконання робіт необхідно використовувати засоби індивідуального захисту, зокрема захисні рукавички, окуляри, респіратори, спецодяг та захисне взуття. Засоби індивідуального захисту повинні підбиратися з урахуванням характеру небезпек і регулярно перевірятися на справність.

Особливу небезпеку під час демонтажу становлять акумулятори та батареї, зокрема літій-іонні. Їх пошкодження може призвести до займання або вибуху, тому такі елементи необхідно вилучати обережно та зберігати у спеціально відведених вогнетривких контейнерах. Забороняється механічне пошкодження, нагрівання або коротке замикання акумуляторів.

У процесі демонтажу слід уникати утворення пилу та виділення токсичних речовин, для чого необхідно застосовувати місцеву витяжну вентиляцію та дотримуватися санітарно-гігієнічних вимог. Забороняється приймання їжі, паління та зберігання сторонніх предметів у зоні виконання робіт.

У разі виникнення аварійної ситуації, зокрема пожежі, витоку небезпечних речовин або ураження працівника електричним струмом, роботи повинні бути негайно припинені, а персонал — діяти відповідно до затверджених інструкцій з охорони праці та пожежної безпеки.

Таким чином, дотримання комплексу заходів техніки безпеки при демонтажі електронних та електричних приладів є необхідною умовою забезпечення безпечних умов праці, зниження рівня професійних ризиків та запобігання негативним наслідкам виробничої діяльності.

ВИСНОВКИ

У ході дослідження проаналізовано поняття та класифікацію електронних відходів, а також визначено основні джерела їх утворення. Встановлено, що електронні відходи характеризуються складною структурою та містять як небезпечні токсичні речовини, так і значну кількість цінних вторинних ресурсів, що обумовлює необхідність їх раціонального та контрольованого поводження. Все зазначене дозволило сформулювати наступні висновки:

1. Проаналізовано масштаби утворення електронних відходів у світі та виявлено тенденцію до їх щорічного зростання. Доведено, що недостатній рівень офіційної переробки призводить до негативного впливу на навколишнє середовище, зокрема забруднення ґрунтів, водних ресурсів і атмосферного повітря, а також сприяє зростанню викидів парникових газів і посиленню кліматичних змін.

2. У роботі досліджено вплив електронних відходів на здоров'я людини та встановлено, що наявність у їх складі важких металів і токсичних сполук становить серйозну небезпеку, особливо в умовах несанкціонованої утилізації. Обґрунтовано необхідність впровадження сучасних систем управління електронними відходами, заснованих на принципах циркулярної економіки та розширеної відповідальності виробника.

3. У результаті аналізу встановлено, що найбільш проблемними компонентами електронних відходів є друковані плати, які поєднують високий вміст цінних металів з наявністю токсичних речовин. Обґрунтовано доцільність вибору друкованих плат як об'єкта дослідження та доведено, що їх переробка потребує застосування технологічно складних і екологічно контрольованих методів.

4. Порівняльний аналіз механічних, гідрометалургійних, пірометалургійних та біометалургійних технологій показав, що жоден із методів не є універсальним. Механічні методи доцільні як етап попередньої підготовки, гідрометалургія забезпечує високий рівень вилучення цінних

металів, пірометалургія ефективна при великих обсягах переробки, а біометалургія вирізняється низьким енергоспоживанням та екологічною безпечністю, проте потребує тривалого часу процесу.

5. Застосування комплексної методики оцінки ефективності з використанням інтегральних індексів дозволило об'єктивно порівняти досліджувані технології з урахуванням екологічних, ресурсних, енергетичних та економічних показників. Встановлено, що найвищу загальну ефективність демонструють комбіновані технологічні схеми, які поєднують механічну підготовку з гідрометалургійними або біометалургійними процесами.

6. Проведена економічна оцінка показала, що рентабельність переробки електронних відходів значною мірою залежить від масштабу виробництва, вартості вилучених металів та ефективності логістики. Найбільш економічно доцільними є технології, що забезпечують високий ступінь вилучення цінних компонентів при помірних енерговитратах.

Узагальнюючи результати дослідження, можна зробити висновок, що впровадження ефективних та екологічно безпечних технологій утилізації електронних відходів, у поєднанні з належною організацією охорони праці, є необхідною умовою зменшення негативного впливу електронних відходів на довкілля, здоров'я людини та клімат, а також перспективним напрямом сталого розвитку в умовах України.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Базельська конвенція про контроль за транскордонним перевезенням небезпечних відходів та їх видаленням. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/995_022#Text
2. Главацька Л.Ю., Іщенко В.А. Аналіз складу компонентів електронних та електричних відходів. *Вісник Вінницького політехнічного інституту*. 2021. № 1. С. 42-48.
3. Данилова Н. Чому давно пора зайнятися переробкою електронних відходів. 08.11.2021. URL: <https://interfax.com.ua/news/greendeal/778301.html>.
4. Закон України «Про управління відходами» № 2804-IX від 01.12.2022. Відомості Верховної Ради (ВВР), 2023, № 17, ст.75.
5. Зелений лист. URL: <https://zeleniy-list.od.ua/>.
6. Зелений птах. URL: <https://zeleniyptah.com.ua/>.
7. Екодія. URL: <https://ecoaction.org.ua/>.
8. Екологічні ризики: природа і критерії / Войціцький В.М., Хижняк С.В., Данчук В.В. та ін.. Екологічні науки. 2020. № 4(31). С. 131–135.
9. Електронні відходи: глобальний виклик для людства і планети. URL: <https://mepr.gov.ua/elektronni-vidhody-globalnyj-vyklyk-dlya-lyudstva-i-planety>.
- 10.Ємченко І.В. Електронні відходи: гальмівний чинник сталого розвитку. *Науковий вісник Полтавського університету економіки і торгівлі. Серія «Технічні науки»*. 2023. № 3. С. 34–38.
- 11.Кідалов С. О. Правове регулювання поводження з відходами електронного та електричного обладнання. Проблеми екологічного законодавства. URL: <http://www.sulj.oduvs.od.ua/archive/2019/3/33.pdf>
- 12.Літвак О.А. Екологічна освіта молоді в контексті розвитку циркулярної економіки. *Перспективи та інновації науки*. 2022. № 7(12). С. 240–252.
- 13.Літвак О.А., Гребеник С.М. Дослідження впливу несанкціонованої утилізації електронних відходів на стан навколишнього середовища. *Проблеми екології та енергозбереження* : матеріали XVI Міжнародної

науково-технічної конференції, м. Миколаїв 23-24 жовтня 2025 р. Миколаїв: НУК, 2025.

- 14.Літвак О.А., Літвак С.М. Пріоритетні напрями реалізації концепції циркулярної економіки: світові тенденції. *Наука і техніка сьогодні*. 2022. № 5. С. 122–138.(Журнал включено до наукометричної бази Index Copernicus)
- 15.Літвак О.А. Питання переробки електронних відходів в контексті розвитку циркулярної економіки. *Сталий розвиток: захист навколишнього середовища. Енергоощадність. Збалансоване природокористування*. матеріали VII Міжнародного конгресу, 12-14 жовтня 2022 р., Львів. Київ : Яроченко Я.В., 2022. С. 128.
- 16.Нагара М.Б. Циркулярна економіка: генезис, структура, особливості. *Економіка та держава*. 2021. № 10. С. 68–73.
- 17.Національна стратегія управління відходами в Україні до 2030 року. Розпорядження Кабінету Міністрів України від 08.11. 2017, № 820-р. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/820-2017-%D1%80#Text>.
- 18.Нормативи гранично-допустимих викидів забруднюючих речовин із стаціонарних джерел. Наказ Міністерства охорони навколишнього середовища України 27.06.2006, № 309. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0912-06#Text>.
19. Повідомлення про оприлюднення проєкту Закону «Про електричне та електронне обладнання та відходи електричного та електронного обладнання». Міністерство захисту довкілля та природних ресурсів України. URL: <https://mepr.gov.ua/povidomlennya-pro-oprylyudnennya-proyektu-zakonu-pro-elektrychne-ta-elektronne-obladnannya-ta-vidhody-elektrychnogo-ta-elektronnogo-obladnannya/>.
20. Поводження з відходами електричного та електронного обладнання (BEEO): міжнародний досвід і українські реалії. URL: <https://ecolog-ua.com/news/povodzhennya-z-vidhodamy-elektrychnogo-ta-elektronnogo-obladnannya-veeo-mizhnarodnyy-dosvid-i>.
- 21.Пожарова О. В. Охорона праці : навчальний посібник. Одеса, 2022. 86 с.

22. Практичні аспекти поводження з відходами на підприємстві: покроковий алгоритм. Офіс сталих рішень. 11 листопада 2022 р. URL: <https://ukraine-oss.com/praktychni-aspekty-povodzhennya-z-vidhodamy-na-pidpryyemstvi-pokrokovyj-algorytm/>.
23. Ринок небезпечних відходів України: про важливе у цифрах. URL: <https://pro-consulting.ua/ua/pressroom/rynok-opasnyh-othodov-ukrainy-vazhnoe-v-cifrah-material-pro-consulting-dlya-ekologiya-ekonomika>.
24. Adapting Stand-Alone Renewable Energy Technologies for the Circular Economy through Eco-Design and Recycling / Gallagher J. et al. *Journal of Industrial Ecology*. 2019. 23. P. 133–140.
25. A new Circular Economy Action Plan for a cleaner and more competitive Europe. EC of the European Parliament and of the Council of 11.03.2020. Brussels. 2020. 19 p.
26. A New Circular Vision for Electronics Time for a Global Reboot. Platform for accelerating the circular economy. January 2019. 24 p.
27. Ani L.S., Jumanazarova G., Nasurova, K., Asatullaev K. Reduction of cost and emissions by using recycling and waste management system. *Brazilian Journal of Biology*. 2023. № 83(4), e279565.
28. Arya, S., Kumar, S.. Bioleaching: urban mining option to curb the menace of E-waste challenge. *Bioengineered*. 2020. № 11(1). P. 640–660.
29. Baldé, C. P., et al., The Global E-waste Monitor 2017, UNU, ITU, ISWA, 2017.
30. Bo Niu, Shanshan E., Zhenming Xu, Jie Guo. How to efficient and high-value recycling of electronic components mounted on waste printed circuit boards: Recent progress, challenge, and future perspectives. *Journal of Cleaner Production*. 2023. Vol. 415. 137815.
31. Chatterjee A., Abraham J., Efficient Management of E-Wastes. *International Journal of Environmental Science and Technology*. 2017. № 14. P. 211–222.
32. Circular Economy Guide. ABN AMRO, 2016. 49 p.
33. Climate Change. Energy and climate are inextricably linked. URL: <https://www.iea.org/topics/climate-change>.

34. Closing the loop – An EU action plan for the Circular Economy. Communication from the Commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions. European Commission. Brussels, 2015. 21 p.
35. Cui H., Anderson C.G. Literature Review of Hydrometallurgical Recycling of Printed Circuit Boards (PCBs). *Journal of Advanced Chemical Engineering*. 2016. № 6: 142.
36. Directive 2002/96/EC on waste electrical and electronic equipment of 27 January 2003/ European Parliament and council. – Official Journal of the European Union, 2003. 58 p.
37. Directive 2002/95/EC on the restriction of the use of certain hazardous substances in electrical and electronic equipment of 27 January 2003 / European Parliament and council. – Official Journal of the European Union, 2003. 47 p.
38. Directive 2009/125/EC of the European Parliament and of the Council of 21 October 2009 establishing a framework for the setting of ecodesign requirements for energy-related products. *Official Journal of the European Union*. V.52. 31 October 2009. L 285.
39. Directive (eu) 2020/2184 of the European Parliament and of the Council of 16 December 2020 on the quality of water intended for human consumption (recast). *Official Journal of the European Union*. 23.12.2020. L 435.
40. Ellen MacArthur Foundation, Circular Consumer Electronics, An Initial Exploration, 2018, URL: www.ellenmacarthurfoundation.org/assets/downloads/Circular-Consumer-Electronics-2704.pdf.
41. Environment, Health, Safety, and Sustainability at Xerox. URL: <https://www.xerox.com/en-us/about/ehs>.
42. Environmental Protection Agency. Cadmium Compounds. URL: <https://www.epa.gov/sites/default/files/2016-09/documents/cadmium-compounds.pdf>

43. Espejo, D. Assessment of the Flow and Driving Forces of Used Electrical and Electronic Equipment From Germany to Nigeria. Brandenburg University of Technology, Cottbus, Germany. 2010. P.32–37.
44. E-waste Solutions: Understanding PCB Recycling. URL: https://www.genoxtech.com/en/news_i_understanding-pcb-recycling.html.
45. Fetanat A., Tayebi M., Shafipour G. Management of waste electrical and electronic equipment based on circular economy strategies: navigating a sustainability transition toward waste management sector. *Clean Technology Environment*. 2021. № 23. P. 343–69.
46. Global Energy Review 2025. International Energy Agency, March 2025. 43 p.
47. Grant K. et al. Health consequences of exposure to e-waste: a systematic review, *The Lancet*, 6 December 2013.
48. Growth within: a circular economy vision for a competitive Europe. Ellen MacArthur Foundation. McKinsey Center for Business and Environment. 2015. 98 p.
49. Hatcher G.D., Ijomah W.L., Windmill J.F.C. Design for remanufacture: a literature review and future research needs. *Journal of Cleaner Production*. V.19, Is. 17–18, November–December 2014, P. 2004–2014.
50. How the circular economy is changing business. Green and sustainable solutions from Norway. The Explorer. URL: <https://www.theexplorer.no/stories/renewable-resources/an-introduction-to-the-circular-economy>.
51. Huisman, J., van der Maesen, M., Eijsbouts, R.J.J., Wang, F., Baldé, C.P., Wielenga, C.A., (2012), The Dutch WEEE Flows. United Nations University, ISP – SCYCLE, Bonn, Germany, March 15th 2012, 46 p.
52. Incineration. Wikipedia, the free encyclopedia. URL: <https://chatgpt.com/c/6886845e-6f64-8001-8d91-3b5afa39408c>
53. International Labour Organization, Decent work in the management of electrical and electronic waste (e-waste), March 2019 A New Circular Vision for Electronics: Time for a Global Reboot 23.

54. Kaya, M. Recovery of Metals and Nonmetals from Electronic Waste by Physical and Chemical Recycling Processes. *Waste Managment*. 2016. № 57, P.64–90.
55. Korhonen J., Honkasalo A., Seppälä J. Circular economy: the concept and its limitations. *Ecological economics*. 2018;(143):37–46.
56. Lindhqvist T. Extended producer responsibility. The WEEE Report made by Greenpeace International and European Environmental Bureau. 2003. 56 p.
57. Lindhqvist T. Extended Producer Responsibility in Cleaner Production. - The International Institute for Industrial Environmental Economics. – Lund University: Lund, Sweden, 2005. 89 p.
58. Mangmeechai A. The life-cycle assessment of greenhouse gas emissions and life-cycle costs of e-waste management in Thailand. *Sustainable Environment Research*. 2022. 32:16.
59. Material Impact Profiles Which materials to prioritize for a 100 percent recycled and renewable supply chain. Apple Inc. 2019. 18 p.
60. Osibanjo O., Nnorom I.C. The challenge of electronic waste (e-waste) management in developing countries. *Waste Management Research*. 2007. № 25. P.489–501.
61. Quinto S., Law, N., Fletcher C., Le, J., Antony Jose S., & Menezes P. L. Exploring the E-Waste Crisis: Strategies for Sustainable Recycling and Circular Economy Integration. *Recycling*. 2025. № 10(2), 72.
62. Prakash P., Sheng-Lung L., Chi-Ting T. Environmental and economic performance analysis of recycling waste printed circuit boards using life cycle assessment. *Journal of Environmental Management*. 2020. 276(30):11127.
63. Priya A., Hait S. Biometallurgical recovery of metals from waste printed circuit boards using pure and mixed strains of *Acidithiobacillus ferrooxidans* and *Acidiphilium acidophilum*. *Process Safety and Environmental Protection*. 2020. Vol.143. P. 262–272.
64. Ruiz A. Latest Global E-Waste Statistics And What They Tell Us. April 15, 2024. URL: <https://theroundup.org/global-e-waste-statistics/>.

65. Shahabuddin M., Uddin M.N., Chowdhury J.I., Ahmed S.F., Uddin, M.N., Mofijur M., Uddin M.A. A Review of the Recent Development, Challenges, and Opportunities of Electronic Waste (e-Waste). *International Journal of Environmental Science and Technology*. 2023. № 20, P.4513–4520.
66. Shin Se-Ra, Mai Van Dung, Lee Dai-Soo. Chemical Recycling of Used Printed Circuit Board Scraps: Recovery and Utilization of Organic Products. *Processes*. 2019, 7, 22.
67. Single shaft shredders. ZHS – horizontal shredders ZERMA. URL: https://zerma.com/english/machinery/shredder.html#id_zhs.
68. The global E-waste Monitor 2024. UNITAR, ITU. November 2024. 150 p.
69. The Growing Environmental Risks of E-Waste. Geneva Network. URL: <https://www.genevaenvironmentnetwork.org/resources/updates/the-growing-environmental-risks-of-e-waste/>.
70. Towards the Circular Economy: Accelerating the scale-up across global supply chains. Ellen MacArthur Foundation and McKinsey & Company. Published by World Economic Forum, Geneva, Switzerland, 2014. 64 p.
71. Transforming our world: the 2030 Agenda for Sustainable Development. Resolution adopted by the General Assembly on 25 September 2015. United Nations. 2015. 35 p.
72. UN and World Business Council for Sustainable Development. – 2019. URL: http://www.weforum.org/docs/WEF_A_New_Circular_Vision_for_Electronics.pdf.
73. Waste-to-energy. Wikipedia, the free encyclopedia. URL: <https://en.wikipedia.org/wiki/Waste-to-energy>.
74. Zero Waste Lviv. URL: <https://zerowastelviv.org.ua/#>.